Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

621.3
Х-20.

А. М. ХАРИТОНОВ

МНОГОСКОРОСТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ



·ЭНЕРГИЯ·

ЮГП

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 332

А. М. ХАРИТОНОВ

МНОГОСКОРОСТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ







«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1971

6П2.1.081
Х 20
УДК 621.313.333.045.58:62—83

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Мандрыкин С. А., Каминский Е. А., Розанов С. П., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Соколов Б. А., Устинов П. И.

Харитонов А. М.

Х 20 Многоскоростные двигатели в промышленных электроприводах. М., «Энергия», 1971.

96 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 332).

В брошюре рассматриваются вопросы применения многоскоростных двигателей в промышленности, их эксплуатации и ремонта. Описаны способы переделки в заводских условиях односкоростных электродвигателей на многоскоростные. Приведены сведения по многоскоростным двигателям, аппаратуре для переключения двигателя на различные скорости вращения.

Брошюра предназначена для широкого круга работников, связанных с изготовлением, эксплуатацией и ремонтом электрооборудования на машиностроительных и электроремонтных заводах: электромонтеров монтеров-обмотчиков, электротехников, электромонтажников.

3-3-10
128-70

6П2.1.081

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются в настоящее время основным видом электропривода во всем мире. Скорость вращения ротора асинхронного электродвигателя можно регулировать двумя путями: изменением скольжения; изменением скорости вращения магнитного поля. Изменение скольжения возможно лишь при наличии момента сопротивления, приложенного к валу двигателя, и достигается включением резисторов (сопротивлений) в цепь статора или ротора, причем обычно применяемое включение резисторов в цепи ротора возможно лишь для двигателей с фазовым ротором. При таком регулировании скорости велики потери электроэнергии, а также скорость вращения сильно зависит от момента нагрузки по валу двигателя. Изменение же скорости вращающегося магнитного поля асинхронных двигателей может быть осуществлено двумя способами: изменением частоты сети и изменением числа полюсов обмотки двигателя.

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей изменением частоты возможно при наличии специальной сети или специальных преобразователей, частота тока в которых может изменяться плавно или ступенями. В зависимости от этого плавно или ступенчато изменяется скорость вращения двигателей. Изменение числа полюсов обмотки двигателя может производиться только ступенями ($2p=2$, 4, 6, 8 и т. д.; здесь $2p$ — число пар полюсов); следовательно, в этом случае возможно лишь ступенчатое регулирование скорости вращения двигателя. При питании током от сети с частотой 50 *гц* возможны следующие синхронные скорости вращения двигателя: 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600, 500 *об/мин* и т. д., соответствующие обмоткам с 2, 4, 6, 8, 10, 12 полюсами и т. д.

В электроприводах общего применения регулирование скорости вращения асинхронных короткозамкнутых

двигателей путем изменения числа полюсов обмотки получило самое широкое распространение, так как по сравнению с регулированием скорости изменением частоты оно осуществляется более простыми способами. В асинхронных двигателях число полюсов магнитного поля и их расположение определяются полностью электрической схемой обмотки статора. Изменения числа полюсов можно достичь двумя путями. Расположив в пазах статора асинхронного двигателя отдельные независимые друг от друга обмотки с различными числами полюсов, можно, подключая к сети ту или другую обмотку, получить соответствующие скорости вращения ротора двигателя. Вторым путем является секционирование одной статорной обмотки. В асинхронных двигателях с одной статорной обмоткой изменение скорости вращения двигателя достигается путем определенного пересоединения обмотки, называемого «переключением полюсов обмотки».

Таким образом, применяя одну или несколько отдельных статорных обмоток, получают двигатель с несколькими определенными скоростями вращения ротора — многоскоростной двигатель. Наряду с возможностью получать несколько различных скоростей вращения в многоскоростном двигателе сохраняются все достоинства короткозамкнутого асинхронного электродвигателя, обеспечившие последнему преобладающее применение в промышленности.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Схемы обмоток. Переключатели полюсов. Обычно многоскоростные двигатели имеют две, три или четыре различные скорости вращения. В большинстве случаев многоскоростные двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором, так как при выполнении многоскоростного двигателя с фазным ротором потребовался бы дополнительный переключатель полюсов для переключения обмотки ротора. Статорная обмотка многоскоростного двигателя обычно представляет собой двухслойную обмотку переменного тока с выводами на переключатель полюсов. Такая обмотка ничем не отличается от обычных статорных обмоток двигателей переменного тока, и выполнение ее в процессе производства двигателей не представляет трудности. Полезная мощность многоскоростного двигателя с несколькими отдельными обмотками значительно уменьшается по сравнению с мощностью однообмоточного многоскоростного двигателя, выполненного на том же сердечнике. Поэтому хотя в принципе возможно изготовить многоскоростные двигатели с несколькими отдельными обмотками, на практике многоскоростные двигатели с числом отдельных обмоток больше двух не встречаются.

Сравнение двигателей одинаковой мощности, выполненных с одной и двумя обмотками, показывает, что при двухобмоточных схемах затрачивается на 40—50% больше обмоточной меди и на 30—40% больше электротехнической стали, чем при однообмоточной. Кроме того, понижаются к. п. д. и $\cos\varphi$ двигателя. С другой стороны, двухобмоточные многоскоростные двигатели обычно имеют более простую схему переключателя полюсов, а сам переключатель получается меньших размеров, чем у однообмоточных электродвигателей, благодаря меньшему числу переключаемых выводов от обмо-

ток, что является преимуществом двухобмоточных двигателей. Кроме того, при двух отдельных обмотках возможно в максимальной степени приблизить технические данные двигателя к требуемым режимам работы на каждой скорости.

При переключении скоростей вращения в отношении 1 : 2 при двух отдельных обмотках требуется шесть выводов на переключатель полюсов (от каждой обмотки, соединенной в звезду, выходят по три вывода). Такое же количество выводов остается и при одной обмотке, переключаемой по общеизвестным схемам △/λλ, λλ/△ и λ/λλ на две скорости, относящиеся как 1 : 2. Поэтому в двухскоростных двигателях с отношением скоростей вращения 1 : 2 применяют всегда одну обмотку. Две скорости вращения, находящиеся в других соотношениях, а также три и четыре скорости получают с помощью одной или же двух отдельных обмоток. Применяя для получения трех скоростей вращения две отдельные обмотки, берут одну обмотку на две скорости, относящиеся как 1 : 2, и вторую обмотку на третью скорость. При этом число выводов достигает девяти (шесть выводов от двухскоростной обмотки и три от соединенной в звезду односкоростной обмотки), в то время как при одной обмотке, выполненной на три скорости вращения, число выводов в зависимости от схемы переключения и соотношения между скоростями колеблется от 9 до 18. Для получения четырех скоростей при двух отдельных обмотках берут обмотки, переключаемые каждая на числа полюсов с отношением 2 : 1. Число выводов в зависимости от схем соединения колеблется от 12 до 14.

Следует отметить, что при двух отдельных обмотках в четырехскоростном электродвигателе возможно получить лишь две пары скоростей вращения, относящиеся как 1 : 2, например 500/1 000/750/1 500 или 500/1 000/ /1 500/3 000 *об/мин.* В противном случае число выводов значительно возрастает. Если в отношении двухскоростных двигателей с отношением скоростей вращения 1 : 2 установлено безусловное преимущество однообмоточного исполнения по сравнению с двухобмоточным, то подобной ясности в отношении двухскоростных двигателей со скоростями вращения, отличающимися от 1 : 2, а также трех- и четырехскоростных электродвигателей до последнего времени еще не было.

В Советском Союзе большинство электромашиностроительных заводов выпускает многоскоростные электродвигатели двухобмоточного исполнения, в то же время одним из заводов с 1950 г. успешно выпускаются в большом количестве однообмоточные многоскоростные двигатели. Большинство электротехнических фирм в капиталистических странах также выпускают двухобмоточные многоскоростные двигатели. Вместе с тем некоторые фирмы в Англии и ФРГ наряду с двухобмоточными двигателями производят и однообмоточные.

По мнению автора, в большинстве случаев, с которыми приходится сталкиваться на практике, экономически выгоднее применять однообмоточные и многоскоростные двигатели вместо двухобмоточных.

Основные требования к обмоткам многоскоростных электродвигателей. Наиболее важные требования, предъявляемые к обмоткам многоскоростных двигателей, следующие:

1. Максимальное использование двигателя на низшей скорости вращения, с тем чтобы полезная мощность двигателя отличалась возможно меньше от мощности односкоростного двигателя (того же габарита) с тем же числом полюсов обмотки.

2. Оптимальные электрические и механические характеристики двигателя при каждой скорости вращения.

3. Переключение обмотки на каждую скорость вращения при возможно меньшем числе включаемых выводов от обмотки.

4. Многоскоростная обмотка должна быть достаточно надежна в эксплуатации.

5. Переключатель полюсов должен быть несложен по конструкции и иметь возможно меньшие размеры.

6. Выполнение обмотки многоскоростного двигателя и последующий ее ремонт не должны быть сложнее, чем обычной односкоростной обмотки.

В зависимости от конкретных условий работы многоскоростного двигателя обычно выдвигаются как наиболее важные те или другие требования к его обмотке. Наиболее часто встречающимся требованием к многоскоростной обмотке является максимальное использование модели двигателя на низшей скорости вращения. Рассматривая и анализируя факторы, ухудшающие ис-

пользование активных материалов асинхронного двигателя в многоскоростном исполнении по сравнению с односкоростным, нетрудно установить, что при одинаковых прочих условиях (магнитные и электрические нагрузки, заполнение паза обмоткой и т. д.) причинами, могущими снизить мощность двигателя в многоскоростном исполнении, могут явиться лишь обмоточный коэффициент и ухудшение энергетических показателей. Поэтому для выполнения требования о максимальном использовании двигателя на низшей скорости вращения необходимо, чтобы при наибольшем числе полюсов: а) обмоточный коэффициент многоскоростной обмотки был максимальным; б) к. п. д. и $\cos\varphi$ многоскоростного двигателя не отличались от соответствующих показателей аналогичного по мощности и числу полюсов обмотки односкоростного двигателя.

Для обеспечения оптимальных характеристик двигателя при каждой скорости вращения следует проанализировать возможные схемы многоскоростных обмоток для заданного режима работы двигателя. Выбор схемы обмотки, наиболее подходящей для требуемого режима работы двухскоростного двигателя с переключением чисел полюсов в отношении 1 : 2, особых затруднений не вызывает. Значительно сложнее бывает составить схему для трех- или четырехскоростного однообмоточного двигателя. Оптимальными в отношении надежности в эксплуатации и минимальных габаритов переключателя полюсов являются те схемы обмоток, в которых общее число выводов, переключаемых при всех изменениях скоростей вращения, является минимальным. Весьма распространенное мнение, что сложность схемы переключателя полюсов определяется общим числом выводов от обмотки, неправильно: общее число выводов от обмотки определяет лишь габариты переключателя полюсов. Сложность схемы переключателя полюсов определяется не числом выводов от обмотки на переключатель, а общим числом переключений выводов при всех изменениях скоростей, т. е. суммой выводов, включаемых во всех положениях переключателя.

Надежную схему переключения обмотки и несложный переключатель можно получить и при сравнительно большом числе выводов от обмотки на переключатель, если часть выводов при некоторых изменениях скоростей вращения в переключениях не участвует.

Режимы работы многоскоростных электродвигателей. Схемы обмоток многоскоростных двигателей могут быть разбиты на четыре группы:

1. Схемы, при которых двигатель при любой скорости вращения может развивать одинаковую полезную мощность P. Режим работы двигателя P=const характерен для привода главного движения большинства металлорежущих станков, работающих при черновой обработке на малых скоростях со значительными усилиями, вызванными большим сечением стружки, в то время как чистовая обработка ведется на повышенных скоростях с меньшими усилиями, изменяющимися примерно обратно пропорционально скорости.

2. Схемы, при которых мощность на валу двигателя возрастает пропорционально увеличению скорости, т. е. момент на валу двигателя M сохраняется неизменным. Режим работы двигателя M=const характерен для приводов подач и вспомогательных приводов металлорежущих станков, большинства машин и другого оборудования, компрессоров и т. п.

3. Схемы, при которых мощность на валу двигателя может нарастать быстрее, чем возрастает скорость вращения электродвигателя (M=var). Двигатели с переменным моментом M=var, в которых окружные усилия изменяются пропорционально скорости вращения (т. е. мощность пропорциональна квадрату скорости), применяются в приводах центробежных насосов, вентиляторов и воздуходувок, за исключением нагнетательных.

4. Схемы, при которых на высших скоростях полезная мощность двигателя уменьшается по сравнению с его мощностью при низшей скорости вращения. Подобный режим работы многоскоростного двигателя будет иметь место в тех случаях, когда основная полезная нагрузка прикладывается к валу двигателя при низшей скорости вращения, в то время как при высшей скорости обеспечивается выполнение технологических функций, не требующих значительной затраты мощности (ускоренные перемещения инструмента в металлорежущих станках, быстрый возврат механизма в начальное положение и т. д.).

На практике наибольшее распространение получили схемы обмоток первых двух групп. Реже встречаются схемы 3-й группы. Схемы 4-й группы применяются чрезвычайно редко. Термины «режим работы двигателя

P=const» или «режим работы двигателя M=const» означают, что при изменении скорости вращения двигателя максимальные полезная мощность или момент, которые могут быть сняты с вала, остаются приблизительно постоянными. При работе в установившемся режиме мощность и момент на валу двигателя определяются исключительно характером приложенной нагрузки, а не схемой переключения обмотки двигателя. Эти термины указывают на то, что паспортная мощность (или соответственно паспортный момент) двигателя при переключении по данной схеме может быть сохранена длительно неизменной независимо от скорости вращения, без опасения перегрева обмотки выше допустимого предела.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Преимущества применения многоскоростных двигателей. Замена обычных односкоростных двигателей многоскоростными во многих случаях существенно улучшает технологические и эксплуатационные качества машин и станков и снижает трудоемкость их изготовления.

Многоскоростные двигатели применяются:

а) в приводах машин, скорость которых желательно изменять в зависимости от размеров, твердости и других физических качеств обрабатываемого материала или в зависимости от технологических факторов. Сюда относятся металлорежущие и деревообрабатывающие станки, центробежные сепараторы, землечерпалки и другие механизмы для различных областей применения;

б) в машинах и механизмах, имеющих различную скорость рабочего и холостого хода (лесопильные рамы);

в) для пуска в ход и остановки без резких толчков масс, обладающих значительной инерцией (элеваторы, подъемники). В этом случае рабочий процесс происходит при наибольшей скорости вращения, а пуск и остановка механизма — при малой скорости, часто с автоматическим переключением чисел полюсов;

г) в приводах машин с мощностью, изменяющейся в зависимости от времени суток, времени года и т. п. (насосы, воздуходувки, загрузочные устройства, транспортеры и т. д.);

д) в приводах машин, имеющих несколько различных назначений, для каждого из которых требуется различная скорость, например, оборудование нефтяных скважин, где низшая скорость применяется для перекачки нефти, а высшая — для установки труб;

е) в механизмах, изменение скорости которых обусловливается потребляемой мощностью. В качестве примера можно привести листопрокатные станы, где вначале при значительной деформации металла прокатка производится на низкой скорости, а отделочные операции — на высокой. Для сталелистопрокатных станов применяются двухскоростные электродвигатели мощностью до 3 300/4 800 *квт* при $2p = 56/28$, а для медelистопрокатных — 375 *квт* при $2p = 16/8$;

ж) в агрегатах, где, помимо регулирования скорости вращения двигателя переключением чисел полюсов, дальнейшее увеличение предела регулирования скорости осуществляется изменением частоты питающей сети. В качестве примера приведем судовые установки, где вначале регулирование скорости судового электродвигателя производится изменением частоты генератора, питающего двигатель. Максимальная же скорость судна достигается путем переключения обмотки судового двигателя на меньшее число полюсов. Следует отметить, что для судов сконструированы наибольшие по мощности многоскоростные двигатели.

Широкое использование многоскоростных двигателей играет важную роль в развитии машиностроения. Благодаря применению многоскоростных двигателей в электроприводах машин и станков возможно:

1) упрощение конструкции станков вплоть до исключения коробок скоростей и подач;

2) повышение производительности, эксплуатационных качеств и удобства обслуживания станков;

3) улучшение качества обработки на станке за счет уменьшения вибраций и снижения неточности работы механизмов с большим числом зубчатых зацеплений;

4) повышение к. п. д. станка за счет сокращения промежуточных звеньев кинематической цепи;

5) изменение скорости на ходу без останова станка;

6) упрощение автоматического управления процессами пуска, останова, реверса и торможения;

7) упрощение автоматического управления режимами обработки в зависимости от технологических факторов.

Пуск в ход двигателя на низшую скорость вращения обладает еще и тем преимуществом, что абсолютное значение пускового тока в этом случае будет, как правило, меньшим, чем пусковые токи для более высоких скоростей. При переключении обмотки с меньшего на большее число полюсов, т. е. при замедлении скорости вращения двигателя автоматически происходит рекуперативное торможение двигателя, сокращающее время останова машины и не связанное с потерями энергии, как это имеет место при торможении противовключением. Широкие возможности для применения многоскоростных двигателей имеются в самых различных типах универсальных и специальных автоматизированных станков: в токарных, токарно-револьверных, сверлильных, фрезерных, шлифовальных, продольно- и поперечно-строгальных, заточных и др.

Наибольшее применение многоскоростные двигатели получили в приводах металлорежущих и деревообрабатывающих станков. Скорость вращения шпинделей станков изменяется по закону геометрической прогрессии, знаменатель которой

$$\varphi=\frac{n_2}{n_1}=\frac{n_3}{n_2}=\ldots=\frac{n_k}{n_{k-1}}.$$

Значительный диапазон регулирования скоростей универсальных металлорежущих станков, особенно если φ мало, требует редукторов или коробок скоростей с большим количеством ступеней регулирования. При осуществлении процесса регулирования лишь одним механическим путем коробки скоростей конструктивно значительно усложняются и требуют более сложной системы управления. Оба эти фактора вызывают повышение трудоемкости и удорожание производства коробок скоростей. Поэтому в станках должны найти более широкое применение системы комбинированного регулирования скорости, представляющее собой сочетание электродвигателя, скорости которого регулируются в достаточно широком диапазоне, с редуктором или сравнительно простой коробкой скоростей, обладающей более высоким к. п. д. по сравнению с более сложными коробками скоростей.

Особенно целесообразно применение многоскоростных двигателей в станках, в которых можно ограничиться двумя, тремя или четырьмя различными скоростями при скорости вращения шпинделя станка, равной ско-

рости двигателя. В этом случае применяются многоскоростные двигатели встроенного исполнения. Статор двигателя встраивается в переднюю бабку станка, а шпиндель через муфту связывается с валом ротора двигателя, или же ротор двигателя насаживается непосредственно на шпиндель. Подобная конструкция станка оказывается исключительно простой, его кинематическая цепь наиболее короткой, а двигатель максимально приближенным к рабочему валу. Если скорость вращения шпинделя станка не совпадает со скоростью вращения многоскоростного двигателя, последний соединяется со шпинделем посредством ременной или зубчатой передачи. Подобная кинематическая схема применяется для операционных токарных, фрезерных станков или небольших сверлильных станков. Добавление к такой схеме простого перебора значительно расширяет диапазон регулирования скорости станка, удлиняя кинематическую цепь станка лишь при малых скоростях вращения.

Многоскоростной двигатель с вариатором скорости. За последние годы в станкостроении внедряются различные виды приводов с плавным регулированием скорости вращения механического, гидравлического или электрического типа.

Бесступенчатые приводы обладают, особенно при электрическом регулировании скорости, наиболее короткими кинематическими цепями. Эти приводы по подбору оптимальной скорости с точки зрения чистоты обрабатываемой поверхности или режима резания, удобству управления и автоматизации превосходят приводы со ступенчатым регулированием. Большинство бесступенчатых приводов при диапазоне регулирования до 5 : 1 на всем диапазоне изменения скорости передают примерно одинаковую мощность, обладая удовлетворительной характеристикой и достаточной надежностью в работе. При увеличении предела регулирования выше 6 : 1 наряду с усложнением конструкции вариатора его характеристики ухудшаются и не обеспечивается требуемая надежность в работе.

Применение в электроприводе станка многоскоростного двигателя, связанного непосредственно с вариатором скорости, значительно расширяет возможность плавного регулирования скорости станка. Применив, например, двухскоростной двигатель $2p=8/2$ и механический вариатор с отношением скоростей 4 : 1, можно осу-

ществить плавное регулирование скорости от 187 до 3 000 *об/мин,* т. е. получить диапазон регулирования 16 : 1. При двухскоростном двигателе 500/3 000 *об/мин* и вариаторе с отношением 6 : 1 диапазон плавного регулирования скорости станка расширяется до 36 : 1. Дальнейшее расширение диапазона регулирования в сторону уменьшения скорости вращения достигается применением после вариатора перебора. Диапазон плавного регулирования скорости привода можно передвинуть в зону больших или меньших скоростей изменением скорости вращения многоскоростного двигателя. Если этого недостаточно, между двигателем и вариатором ставят ускоряющую или понижающую передачу, чаще всего клиноременную или ременную.

Многоскоростной двигатель с муфтой скольжения. Для плавного регулирования скорости в сравнительно небольшом диапазоне до 1 : 4 при постоянном вращающем моменте на валу применяется асинхронный двигатель с муфтой скольжения. К. п. д. такого двигателя определяется выражением $\eta = 1 - s$, где s — скольжение, равное разности скоростей вращения ротора и выходного вала. Следовательно, при $s = 80\%$ к. п. д. будет составлять всего лишь 20%. При этом все потери мощности сосредоточиваются в барабане муфты. Заменив в приводе с муфтой скольжения обычный односкоростной двигатель многоскоростным, можно поднять к. п. д. и расширить диапазон регулирования скорости этого привода. Например, при двухскоростном двигателе с переключением полюсов в отношении 2 : 1 регулирование скорости вращения производится ступенчато в отношении 2 : 1, а в промежутке между этими скоростями и ниже меньшей из них плавная регулировка осуществляется муфтой скольжения. Общий диапазон регулирования составит при этом 4 : 1 при наименьшем к. п. д. $\eta = 50\%$. За счет более полного использования регулировочных свойств муфт (диапазон регулирования 5 : 1) возможно диапазон регулирования расширить до 10 : 1 при наименьшем к. п. д. (при самой малой скорости вращения вала) $\eta = 20\%$.

Применение трехскоростного двигателя с переключением полюсов обмотки $2p = 8/4/2$ позволяет увеличить диапазон регулирования до 8 : 1 при наименьшем к. п. д. привода $\eta = 50\%$ и достичь предела регулирования 20 : 1 при к. п. д. на самой низшей скорости $\eta = 20\%$. При

односкоростном двигателе на наименьшей скорости вращения к. п. д. составлял бы всего лишь 5%, а устойчивое регулирование скорости в таких пределах было бы крайне затруднительным и потребовало бы для своего осуществления ряда дополнительных устройств.

Применение многоскоростного двигателя в комбинации с муфтой скольжения дает по сравнению с односкоростным не только экономический эффект из-за снижения потерь энергии в муфте при регулировании скорости вращения, но и позволяет упростить конструкцию всего устройства. Если, например, при односкоростном приводном двигателе мощностью 5 *квт* производить регулирование скорости вращения муфты в диапазоне 5:1, то при наименьшей скорости к. п. д. муфты всего лишь 20% и, следовательно, в муфте должна быть рассеяна мощность порядка 4 *квт*.

При трехскоростном приводном двигателе $2p=8/6/4$ и регулировании скорости вращения при $M=\text{const}$ на всех скоростях мощность двигателя при каждой скорости будет составлять соответственно 2,5/3,4/5,0 *квт*. Таким образом, максимальная потеря энергии в муфте в промежутке между $2p=4$ и $2p=6$ составит всего 1,6 *квт*, в промежутке между $2p=6$ и $2p=8$ 0,9 *квт* и при регулировании скорости ниже $2p=8$ 1,5 *квт*. Вполне очевидно, что охлаждающее устройство при применении трехскоростного электродвигателя будет более простым, чем при односкоростном двигателе, так как потеря мощности в муфте снизится в 2,5 раза. Многоскоростной двигатель с муфтой скольжения может найти применение в некоторых приводах подач и приводах главного движения быстроходных небольших станков.

Многоскоростные двигатели в высокоскоростных приводах. Металлорежущие станки обладают чрезвычайно широким диапазоном скоростей вращения шпинделей, начиная от десятых долей оборотов в минуту в больших карусельных станках и кончая 50 000—100 000 *об/мин* и выше во внутришлифовальных станках. Развитие станкостроения идет по пути повышения скоростей обработки, и удельный вес быстроходных станков в общем выпуске металлорежущих станков возрастает.

Для многих быстроходных станков иногда требуется не снижение, а, наоборот, повышение скорости от двигателя к шпинделю. В ряде случаев максимально возможная синхронная скорость вращения асинхронного двига-

теля 3 000 *об/мин* при питании от сети с частотой 50 *гц* оказывается уже недостаточной. В качестве примера можно привести скорости резания при фрезеровании деталей из алюминиевых сплавов, находящиеся в пределах 1 500—7 500 *мм/мин* при скорости вращения фрезерных шпинделей 3 000—15 000 *об/мин*. В подобных случаях приходится применять ускоряющие передачи от двигателя к шпинделю станка или двигатели со скоростью вращения более 3 000 *об/мин*, непосредственно связанные со шпинделем. Не останавливаясь на ускоряющих передачах различных видов (механических, гидравлических, пневматических и др.) и различных типах высокоскоростных двигателей постоянного и переменного тока, укажем, что в высокоскоростных приводах станков со скоростью вращения свыше 15 000—20 000 *об/мин* пока наиболее надежным и эффективным оказывается применение электродвигателей, питаемых током повышенной частоты от специального генератора или преобразователя постоянного или переменного тока промышленной частоты в ток повышенной частоты. Часто бывает желательно, чтобы в зависимости от технологических требований скорость вращения высокочастотного двигателя могла плавно или ступенчато изменяться.

Плавного изменения скорости высокочастотного двигателя можно достигнуть плавным изменением частоты тока генератора или преобразователя. Ступенчатое регулирование скорости вращения высокочастотного двигателя можно осуществить тремя способами: ступенчатым изменением скорости привода генератора тока повышенной частоты; изменением числа полюсов обмотки высокочастотного двигателя; комбинируя вместе первый и второй способы. Наиболее просто и надежно ступенчатое изменение скорости вращения генератора осуществляется при применении многоскоростного короткозамкнутого двигателя с переключением обмотки на две, три или четыре скорости.

Для получения тока повышенной частоты до 400—500 *гц* в машиностроении часто пользуются асинхронными преобразователями, преобразующими обычный ток 50 *гц* в ток повышенной частоты. Если приводной многоскоростной двигатель преобразователя имеет a_1 скоростей вращения, то число различных частот тока, которые можно получить от преобразователя при вращении его ротора по направлению и против вращения магнитного

поля статора, будет $2a_1$. При переключении обмотки высокочастотного двигателя на a_2 полюсов получим a_2 скоростей вращения двигателя. Следовательно, общее количество различных ступеней скорости высокочастотного двигателя в этом случае будет $2a_1 a_2$. При применении, например, двухскоростного двигателя в приводе преобразователя частоты и трехскоростного высокочастотного двигателя от последнего можно получить $2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$ различных скоростей вращения. Применив трехскоростной приводной двигатель преобразователя и трехскоростной высокочастотный двигатель, мы будем иметь у последнего $2 \cdot 3 \cdot 3 = 18$ различных скоростей вращения и т. д. Если же в качестве источника тока применен генератор тока повышенной частоты, а не асинхронный преобразователь, то общее количество различных скоростей высокочастотного двигателя составит $a_1 a_2$.

Следует отметить, что регулирование скорости вращения высокочастотных двигателей значительно повышает универсальность этого привода, так как появляется возможность изменять скорость в зависимости от требований технологического характера. Помимо этого, при высокочастотных двигателях со скоростями порядка 50 000 *об/мин* и выше ступенчатое изменение скорости вращения наиболее просто и удобно разрешает вопросы, связанные с пуском и остановом двигателя.

3. СРАВНЕНИЕ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОДНОЙ И ДВУМЯ ОБМОТКАМИ

Полезная мощность. Наиболее частым требованием к многоскоростным обмоткам является максимальное использование двигателя, особенно при низшей скорости вращения, и обеспечение достаточно высоких энергетических показателей и других технических данных при различных числах полюсов. Рассмотрим, как изменяется мощность многоскоростного двигателя при однообмоточном и двухобмоточном исполнениях. Обозначим:

P — мощность по валу;
U — номинальное фазное напряжение;
I — номинальный фазный ток;
η — номинальный к. п. д.;
$\cos\varphi$ — номинальный коэффициент мощности;
Q — сечение провода фазы;

Библиотека ГПИ им. А. А. Жданова

Δ — плотность тока;
E — э. д. с. самоиндукции;
Φ — магнитный поток статора;
B_δ — индукция в воздушном зазоре;
w — число витков фазы;
κ — обмоточный коэффициент;
F — площадь паза статора;
D — внутренний диаметр статора;
l — длина пакета статора.

Как известно, мощность по валу двигателя равна:

$$P = UI \cos \varphi \eta. \qquad (1)$$

Произведя некоторые преобразования формулы (1), получим новое выражение для полезной мощности электродвигателя:

$$P \equiv \frac{B_\delta \Delta D l}{2p} \kappa F \eta \cos \varphi. \qquad (2)$$

В однообмоточном многоскоростном двигателе обмотка будет занимать полностью площадь паза статора. При двухобмоточном исполнении площадь паза статора распределяется между двумя обмотками «а» и «б». Сравнение полезных мощностей при однообмоточном и двухобмоточном исполнениях при одинаковых числах полюсов будем производить для одного и того же двигателя. Величины, относящиеся к однообмоточному исполнению, обозначим индексом 0, а величины, относящиеся к обмоткам «а» и «б» двухобмоточного исполнения, соответственно индексами «а» и «б»:

$$\frac{B_{\delta 0} \Delta_0 \eta_0 \cos \varphi_0}{B_{\delta a} \Delta_a \eta_a \cos \varphi_a} \approx \frac{B_{\delta 0} \Delta_0 \eta_0 \cos \varphi_0}{B_{\delta б} \Delta_б \eta_б \cos \varphi_б} \approx 1. \qquad (3)$$

Приведенные отношения справедливы для двигателей мощностью свыше 10 *квт*. Для двигателей меньшей мощности эти отношения, как правило, будут больше единицы. Следовательно,

$$\frac{P_0}{P_a} = \frac{\kappa_0 F}{\kappa_a F_a}; \ \frac{P_0}{P_б} = \frac{\kappa_0 F}{\kappa_б F_б}, \qquad (4)$$

где $F_а$ и $F_б$ — площади в пазу, занимаемые обмотками «а» и «б».

Обозначим N коэффициент заполнения паза обмоткой:

$$N = \frac{s_n d^2}{F - Q_{из}}, \qquad (5)$$

где s_n — число проводов в пазу;

d — диаметр изолированного провода, *мм;*

$Q_{из}$ — площадь поперечного сечения изоляции в пазу, *мм²*.

В асинхронных электродвигателях общего применения N не должен превышать 0,75, иначе затрудняется укладка проводов в пазы. Таким образом, $N_0 \leqslant 0{,}75$. Для двухобмоточных двигателей значения $N_а$ и $N_б$ зависят от отношений между числами полюсов и заданных режимов работы двигателя при различных скоростях вращения.

Для режима работы $P \approx \text{const}$ $\frac{N_а}{N_б} \approx \frac{p_а}{p_б}$, т. е. распределение площади паза между обмотками «а» и «б» примерно пропорционально числу полюсов, с которыми выполнена обмотка. При режиме работы $M = \text{const}$ мощность на валу двигателя возрастает пропорционально скорости вращения:

$$\frac{N_а}{N_б} \approx 1$$

Для промежуточных режимов работы

$$\frac{N_а}{N_б} \approx 1 \div \frac{P_а}{P_б}.$$

Заменив $\frac{F}{F_а}$ на $\frac{N_0}{N_а}$ и $\frac{F}{F_б}$ на $\frac{N_0}{N_б}$, получаем:

$$\frac{P_0}{P_а} = \frac{k_0 N_0}{k_а N_а}; \qquad (6)$$

$$\frac{P_0}{P_б} = \frac{k_0 N_0}{k_б N_б}. \qquad (7)$$

Таким образом, соотношения между полезными мощностями однообмоточного и двухобмоточного исполнений определяются главным образом соотношениями между обмоточными коэффициентами и площадями паза, занимаемыми обмотками. Остальные факторы имеют второстепенное значение. Значения обмоточных коэффициентов двухскоростного двигателя $k_а$ и $k_б$, с которыми выполняются отдельные односкоростные обмотки при двухобмоточном исполнении, находятся в пределах $0{,}9 \div 0{,}96$. Если двухобмоточный двигатель выполняется на три или четыре различные скорости вращения, обмоточные коэффициенты его обмоток будут $0{,}75 \div 0{,}85$. Обмоточный коэффициент двигателя с одной обмоткой изменяется в значительно большем диапазоне — при низшей

скорости вращения от 0,65 до 0,9, а при высшей скорости от 0,4 до 0,8. Обмоточный коэффициент является одним из важнейших параметров однообмоточных многоскоростных двигателей, определяющим степень использования модели двигателя при каждой скорости вращения. Поэтому при разработке схем переключения обмотки на различные скорости вращения наряду с обеспечением переключения при наименьшем количестве переключаемых выводов обмотки при каждом числе полюсов следует убедиться в том, что значения обмоточного коэффициента находятся в допустимых пределах. Если значения обмоточного коэффициента при низшей скорости вращения меньше 0,6, выполнять двигатель однообмоточным в некоторых случаях не имеет смысла, так как не получается ощутимого выигрыша в мощности двигателя по сравнению с двухобмоточным исполнением.

Обмоточный коэффициент. Элементом или секцией обмотки является катушка, которая состоит из последовательно соединенных витков. Активная сторона катушки расположена в одном пазу. При однослойной обмотке число катушек равно половине числа пазов статора, так как каждая сторона катушки занимает паз полностью. При двухслойной обмотке число катушек, называемых чаще секциями, равно числу пазов статора, так как сторона катушки занимает только половину площади паза.

Катушечной группой называется ряд последовательно соединенных между собой катушек, расположенных в соседних пазах и принадлежащих одной фазе. Соединенные между собой катушечные группы образуют фазу обмотки.

Отдельные катушки или секции статорной обмотки смещены в пространстве друг относительно друга, поэтому результирующая электродвижущая сила, индуктированная в одной фазе, будет меньше алгебраической суммы всех электродвижущих сил, наведенных в катушках.

Обмоточный коэффициент представляет собой отношение геометрической суммы э. д. с., наведенных в отдельных катушках или секциях обмотках, к их алгебраической сумме. Изменением обмоточных коэффициентов достигается значительно большая точность в подборе требуемых соотношений между индукциями или магнитными потоками при различных скоростях вращения, чем комбинациями с сопряжениями фаз обмотки и с соеди-

нениями между собой катушек внутри фазы. Для трехфазной обмотки обмоточный коэффициент выражается формулой

$$\kappa = \kappa_p \cdot \kappa_y \cdot \kappa_c, \tag{8}$$

где κ_p — коэффициент распределения обмотки;

κ_y — коэффициент укорочения (удлинения) обмотки;

κ_c — коэффициент сдвига.

$$\kappa_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q\sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{q}{\tau}\right)}{q\sin\left(\frac{\pi}{2q}\right)}; \tag{9}$$

$$\kappa_y = \sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{y}{\tau}\right); \tag{10}$$

$$\kappa_c = \frac{\sin\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)}{n\sin\frac{\alpha}{2}}, \tag{11}$$

где q — число пазов, занимаемых активными сторонами катушечной группы;

τ — число пазов, приходящихся на полюсное деление;

y — шаг по пазам;

n — число катушек в фазе;

α — угол сдвига между отдельными катушечными группами в фазе в электрических градусах.

Чаще всего катушечные группы, образующие обмотку фазы, сдвинуты между собой на угол 2π *эл. град*, при этом $\kappa_c = 1$. Однако встречаются также схемы, в которых катушечные группы не расположены друг относительно друга под углом 2π *эл. град*, что и учитывается коэффициентом сдвига κ_c, значения которого меньше единицы. Для данного числа полюсов обмотки τ является вполне определенной величиной:

$$\tau = \frac{z}{2p}.$$

Следовательно, обмоточный коэффициент можно изменять, лишь изменяя q или y.

В большинстве случаев, с которыми приходится сталкиваться на практике, κ_p изменяется от 0,96 при распределении обмотки на $^1/_3$ полюсного деления ($q = \tau/3$) до 0,865 при распределении обмотки на $^2/_3$ полюсного деления $\left(q = \frac{2}{3}\tau\right)$.

Лишь в отдельных схемах с целью уменьшения числа выводов обмотки применяется расположение части обмотки фазы на дуге, большей чем $^2/_3\tau$. Благодаря большим укорочениям шага обмотки $\kappa_у$ в многоскоростных двигателях изменяется в пределах $1\div0{,}45$. На основании опыта работы автор считает, что шаг обмотки в многоскоростных двигателях не должен быть менее 0,28—0,3 по отношению к полюсному делению на высшей скорости вращения. При больших укорочениях шага пуск двигателя при высшей скорости вращения затруднителен, что снижает надежность работы двигателя при этой скорости.

Коэффициент сдвига $\kappa_с$ учитывает расположение отдельных катушек обмотки в фазе. Обмоточный коэффициент κ обычно определяется по приведенным выше формулам. В тех случаях, когда подсчет обмоточного коэффициента затруднен тем, что $\kappa_р$, $\kappa_у$ и $\kappa_с$ для каждой катушки имеют различные значения, κ целесообразно определять графическим путем, т. е. построением векторной диаграммы.

В табл. 1 приведены обмоточные коэффициенты обмоток с $2p=12\div2$ в зависимости от расположения обмотки на полюсном делении и укорочения шага при $z=36$.

Способы уменьшения числа переключений выводов многоскоростной обмотки. Рассмотрим методы, обеспечивающие уменьшение количества выводов от обмотки на переключатель полюсов и общего количества включаемых выводов при всех изменениях скоростей вращения.

Расположение обмотки фазы на части окружности, не равной $1/m$ полюсного деления. В m-фазных обмотках асинхронных двигателей с целым числом пазов на полюс и фазу обмотка фазы располагается на $1/m$ полюсного деления. Подобное расположение обмотки фазы в многоскоростных двигателях связано со значительным увеличением числа переключений выводов обмотки при переходе на другое число полюсов.

Распределив обмотку фазы по окружности зазора не на дуге τ/m, а каким-либо другим способом, можно значительно уменьшить количество переключаемых выводов при разных скоростях вращения. Сначала рассмотрим вопрос о распределении фазы обмотки под каждым полюсом на $2/m$ полюсного деления. Подобное распределение обмотки легко получается, если объединить две

лежащие рядом и принадлежащие разным фазам катушки с осями, сдвинутыми на $1/m$ полюсной дуги, в одну катушку, занимающую каждой своей стороной дугу $2\tau/m$. Наиболее часто встречается распределение обмотки фазы при низшей скорости вращения на дуге $^2/_3\tau$ для переключения полюсов 2:1. Число катушек двухслойной обмотки при таком распределении уменьшается вдвое сравнительно с расположением фазы на τ/m и, следовательно, вдвое уменьшается число переключений выводов обмотки, которые следует произвести при переключении обмотки с одного числа полюсов на другое.

Рассмотрим условия, при которых на высших скоростях может быть получена симметричная обмотка без нарушения соединений внутри отдельных катушечных групп. Как известно, основным условием получения симметричной m-фазной обмотки является равномерный сдвиг между отдельными фазами по окружности статора на угол $2\pi/m$. Чтобы переключить обмотку, состоящую при $2p'$ полюсах из C катушечных групп, на $2p$ полюсов и получить при этом симметричную m-фазную обмотку, необходимо, чтобы C/m было целым числом и чтобы катушечные группы при $2p$ полюсах были сдвинуты между собой на z/pm пазов. Если число фаз обмотки m при переключении полюсов обмотки остается неизменным, первое условие C/m, равное целому числу, оказывается выполненным уже при группировке обмотки в катушечные группы при $2p'$ полюсах.

Для того чтобы выполнить второе условие и получить симметричную при $2p$ полюсах обмотку, не прибегая к разъединениям внутри катушечных групп, надо, чтобы сдвиг между отдельными катушечными группами при $2p$ полюсах соответствовал сдвигу между отдельными фазами при этой скорости вращения. Для этого необходимо, чтобы

$$x = \frac{(am+1)\,p'}{p},$$

где x — порядковый номер катушечной группы в пределах $1 \leqslant x \leqslant C/m$;

a — целое любое число, включая 0.

x показывает число катушечных групп, которые следует пропустить, чтобы получить между начальной группой и $x+1$ катушечной группой сдвиг в электрических градусах, соответствующий на этой скорости вращения m-фазной симметричной обмотке. Из сказанного ясно,

	$2p=12$					$2p=$	
y	q	$\frac{y}{\tau}$	$\kappa_p \cdot \kappa_c$	κ_y	κ	q	$\frac{y}{\tau}$
3	1 2 3	} 1	1 0,86 0,66	1	1 0,86 0,67	1 2	$\frac{3}{3,6}$
4	1 2 3	$\frac{4}{3}$	1 0,86 0,66	0,865	0,86 0,75 0,57	1 2	$\frac{10}{9}$
5	1 2 3	$\frac{5}{3}$	1 0,865 0,667	0,5	0,5 0,43 0,33	1 2	$\frac{5}{3,6}$
6	1 2 3	2				1 2	$\frac{5}{3}$
7	1 2 3	$\frac{7}{3}$	1 0,865 0,667	0,5	0,5 0,43 0,33	1 2	$\frac{7}{3,6}$
8	1 2 3	$\frac{8}{3}$	1 0,865 0,667	0,865	0,86 0,75 0,57	1 2	$\frac{8}{3,6}$
9	1 2 3	3	1 0,865 0,667	1	1 0,86 0,67	1 2	$\frac{5}{2}$
10	1 2 3	$\frac{10}{3}$	1 0,865 0,667	0,865	0,86 0,75 0,57	1 2	$\frac{10}{3,6}$
11	1 2 3	$\frac{11}{3}$	1 0,865 0,667	0,5	0,5 0,43 0,33	1 2	$\frac{11}{3,6}$
12	1 2 3	4	4			1 2	$\frac{10}{3}$

Таблица 1

=10			$2p=8$				
$\kappa_p \cdot \kappa_c$	κ_y	κ	q	$\frac{y}{\tau}$	$\kappa_p \cdot \kappa_c$	κ_y	κ
0,94 0,88	0,96	0,90 0,84	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{2}{3}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,865	0,81 0,73 0,69 0,64
0,94 0,88	0,985	0,93 0,87	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{4}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,985	0,92 0,83 0,78 0,73
0,94 0,88	0,82	0,77 0,72	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{5}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,985	0,92 0,83 0,78 0,73
0,94 0,88	0,5	0,47 0,44	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{4}{3}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,865	0,81 0,73 0,69 0,64
0,94 0,88	0,086	0,081 0,076	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{7}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,643	0,60 0,54 0,51 0,48
0,94 0,88	0,34 0,30	0,32 0,30	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{8}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,34	0.32 0.29 0,27 0,25
0,94 0,88	0,707	0,66 0,62	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	2	0,94 0,845 0,795 0,745	0	0
0,94 0,88	0,96	0,90 0,84	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{10}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,34	0,32 0,29 0,27 0,25
0,94 0,88	1	0,94 0,88	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{11}{4,5}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,643	0,60 0,54 0,51 0,48
0,94 0,88	0,865	0,81 0,76	2 3 4—2—4—2 4—4—2—2	$\frac{8}{3}$	0,94 0,845 0,795 0,745	0,865	0,81 0,73 0,69 0,64

	$2p = 6$					$2p =$	
y	q	$\frac{y}{\tau}$	$к_р \cdot к_с$	$к_у$	$к_1$	q	$\frac{y}{\tau}$
3	2 4—2 4	$\frac{1}{2}$	0,965 0,92 0,835	0,707	0,68 0,65 0,59	3 4—2 4	$\frac{1}{3}$
4	2 4—2 4	$\frac{2}{3}$	0,965 0,92 0,835	0,865 0,79 0,73	0,83 0,79 0,73	3 4—2 4	$\frac{4}{9}$
5	2 4—2 4	$\frac{5}{6}$	0,965 0,92 0,835	0,965	0,93 0,89 0,80	3 4—2 4 6	$\frac{5}{9}$
6	2 4—2 4	1	0,965 0,92 0,835	1,0	0,96 0,92 0,83	3 4 4—8 6	$\frac{2}{3}$
7	2 4—2 4	$\frac{7}{6}$	0,965 0,92 0,835	0,965	0,93 0,89 0,80	3 4 4—8 6	$\frac{7}{9}$
8	2 4—2 4	$\frac{4}{3}$	0,965 0,92 0,835	0,865	0,83 0,80 0,72	4 4—8 6	$\frac{8}{9}$
9	2 4—2 4	$\frac{3}{2}$	0,965 0,92 0,835	0,707 0,65	0,68 0,65 0,59	4 4—8 6	1
10	2 4—2 4	$\frac{5}{3}$	0,965 0,92 0,835	0,5	0,48 0,46 0,42	4 6 4—8	$\frac{10}{9}$
11	2 4—2 4	$\frac{11}{6}$	0,965 0,92 0,835	0,26	0,25 0,24 0,22	4 6 4—8	$\frac{11}{9}$
12	2 4—2 4	2	0,965 0,92 0,835	0	0	4—8 6	$\frac{4}{3}$

=4			2p = 2				
$\kappa_p \cdot \kappa_c$	κ_y	κ	q	$\frac{y}{\tau}$	$\kappa_p \cdot \kappa_c$	κ_y	κ
0,96	0,5	0,48					
0,94		0,47					
0,903		0,45					
0,96	0,64	0,62					
0,94		0,60					
0,903		0,58					
0,96	0,765	0,73	4—8	$\frac{5}{18}$	0,955	0,42	0,40
0,94		0,72	6		0,955		0,40
0,903		0,69					
0,835		0,64					
0,96	0,865	0,83	4—8	$\frac{1}{3}$	0,955	0,5	0,48
0,903		0,78	6		0,955		0,48
0,835		0,72					
0,835		0,72					
0,96	0,94	0,90	4—8	$\frac{7}{18}$	0,955	0,57	0,55
0,903		0,8	6		0,955		0,55
0,835		0,78					
0,835		0,78					
0,903	0,985	0,89	4—8	$\frac{4}{9}$	0,955	0,64	0,61
0,835		0,82	6		0,955		0,61
0,835		0,82					
0,903	1	0,90	4—8	$\frac{1}{2}$	0,955	0,707	0,67
0,835		0,83			0,955		0,67
0,835		0,83					
0,903	0,985	0,89	4—8	$\frac{5}{9}$	0,955	0,765	0,73
0,835		0,82	6		0,955		0,73
0,835		0,82					
0,903	0,94	0,85	4—8	$\frac{11}{18}$	0,955	0,82	0,78
0,835		0,78	6		0,955		0,78
0,835		0,78					
0,835	0,865	0,72	4—8	$\frac{2}{3}$	0,955	0,865	0,82
0,835		0,72	6		0,955		0,82

что x и a могут быть только целыми числами. При p'/p, равном целому числу, т. е. при переключениях чисел полюсов в отношении 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1 и т. д., при одном и том же числе фаз на низшей и больших скоростях и $a=0$, можно всегда получить симметричную при высшей скорости обмотку, если на низшей скорости она выполнена с

$$q' = \frac{z}{2p'm} \text{ или } q' = \frac{z}{p'm}.$$

Более сложно обстоит вопрос с распределением фазы на полюсной дуге при переключении обмотки на числа полюсов, когда p'/p не равно целому числу, например при переключении чисел полюсов обмотки в отношении 4 : 3, 6 : 5 и т. д. В этом случае симметричную при $2p$ полюсах обмотку можно получить, если выполнить обмотку при $2p'$ полюсах с числом катушечных групп $C=p'm$, но с числом секций в группе

$$q'_1 = \frac{z}{pm} \text{ и } q'_2 = \frac{z}{2pm} = \frac{q'_1}{2}.$$

Таким образом, общее число катушечных групп обмотки будет определяться наибольшим числом полюсов, а q при этом числе полюсов — числом полюсов, на которое обмотка должна быть переключена. Чередование катушечных групп с q'_1 и q'_2 следует выполнить так, чтобы наиболее просто преобразовать их при $2p$ в двойные группы с $2q'_2=q'_1$. В этом случае $x=am+1$. При $a=0$ получаем $x=1$, т. е. каждая следующая катушечная группа окажется по отношению к предыдущей сдвинутой на угол $2\pi/m$.

Постоянные соединения частей обмотки внутри фазы. В зависимости от соотношения между числами полюсов, на которые переключается многоскоростная обмотка, в некоторых случаях можно соединить отдельные катушечные группы обмотки на низшей скорости так, чтобы эти соединения не нарушались при переключении обмотки на высшие скорости. Например, при переключениях скоростей 2 : 1 могут быть соединены между собой все части обмотки, расположенные друг от друга при низшей скорости на расстоянии $2p$ или $4p$. На высшей скорости эти части обмотки окажутся расположенными соответственно на расстоянии p или $2p$ друг от друга. В первом случае на высшей скорости при p полюсах

придется изменить направление тока в половине катушечных групп по сравнению с тем, которое он имел при $2p$ полюсах, так как теперь катушечные группы в фазе окажутся сдвинутыми между собой не на 360°, а всего лишь на 180°. Во втором случае направление тока в катушечных группах не меняется.

При переключениях чисел полюсов в отношениях, отличающихся от 2 : 1, например при 3 : 2, 3 : 1 или 4 : 3, можно также найти внутри фазы обмотки при низшей скорости вращения такие соединения между катушечными группами, которые и при высших скоростях будут сохранены. Например, для переключения чисел полюсов в отношении 3 : 2 катушечные группы одной фазы, сдвинутые при $2p'$ полюсах на 180°, при переключении на $2p$ полюсов окажутся сдвинутыми на 120°, т. е. будут относиться уже к различным фазам. При сопряжении фаз при $2p$ полюсах в треугольник окажется возможным не разрывать соединения между некоторыми катушечными группами, используя их в качестве соединений между различными фазами.

Выполнение обмотки катушками с различными шагами по пазам. В отношении уменьшения числа выводов от обмотки на переключатель полюсов этот способ выполнения обмотки представляет большие возможности. Наиболее эффективным подобное выполнение обмотки оказывается при соотношениях между скоростями вращения, превосходящими 2 : 1, например 3 : 1, 4 : 1, 5 : 1 и т. д. Действительно, выполнение обмотки с любым шагом, большим y в нечетное число раз (при диаметральном шаге y обмотки на низшей скорости), т. е. при $y_1=3y$, $y_2=5y$ и т. д., с точки зрения обмоточного коэффициента будут равноценными. При этом вследствие большей длины лобовых соединений повышаются потери в обмотке статора и увеличивается рассеяние лобовых частей. Указанный принцип может быть распространен на обмотки, выполненные с любым шагом для наибольшего числа полюсов. При переключении обмотки на меньшее число полюсов обмоточный коэффициент подобной обмотки может быть значительно увеличен за счет увеличения коэффициента укорочения κ_y для новой скорости вращения. Выполнение обмотки с различными шагами по пазам имеет следующие преимущества:

1. Снижение числа переключаемых выводов по сравнению с обычными обмотками с одинаковым шагом.

2. Во всех случаях улучшаются условия пуска двигателя на высших скоростях за счет увеличения шага обмотки.

3. Значительно расширяется предел регулирования скорости вращения однообмоточных многоскоростных двигателей, так как становятся возможными переключения полюсов обмотки в соотношениях 5 : 1, 6 : 1 и выше, недостижимые при обычной обмотке с одинаковым шагом.

Отключение части витков обмотки при высших скоростях вращения. Значительный эффект в смысле снижения числа включаемых выводов и упрощения переключателя полюсов дает отключение части обмотки при высшей скорости вращения при полном использовании всей обмотки при низшей скорости. Если включать всю обмотку лишь при низшей скорости вращения, а при других скоростях часть обмотки отключать, то можно сократить общее число выводов за счет выводов от отключаемой части обмотки и уменьшить количество переключений. Лучшие результаты дает отключение части витков обмотки при соотношениях между числами полюсов, не равных 2 : 1, например для 4 : 3, 3 : 2 и т. д. В последние годы разработаны схемы многоскоростных обмоток, в которых отключение части витков обмотки происходит и при низкой скорости вращения, что ухудшает использование модели двигателя при этой скорости. Число отключаемых витков по сравнению с витками, остающимися включенными при наибольшем числе полюсов, должно быть незначительным (не более 15—20%), иначе теряется смысл в однообмоточном выполнении многоскоростного двигателя.

Сложные сопряжения фаз обмотки при некоторых скоростях вращения. При высших скоростях вращения возможны сопряжения между фазами обмотки, которые в обычных односкоростных обмотках не встречаются. К таким прежде всего относятся сопряжения «звезда — треугольник» и «треугольник — звезда», при которых обмотка расположена при высших скоростях вращения одновременно на сторонах треугольника и лучах звезды. Подобное расположение обмотки обладает значительными преимуществами в смысле снижения влияния высших гармонических.

Несимметричное соединение обмотки. С целью уменьшения числа выводов обмотки и упрощения ее переклю-

чения на высших скоростях обмотку выполняют с числом фаз $m \neq m'$. При этом получается несимметричная обмотка с различными токами в фазах, что ухудшает использование двигателя.

4. СХЕМЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотренные способы сокращения общего числа переключений выводов обмотки многоскоростных двигателей частично или комплексно используются для переключения статорных обмоток асинхронных двигателей на две, три и четыре различных скорости вращения в схемах, описываемых ниже. В большинстве случаев многоскоростные обмотки выполняются двухслойными. Обмотка может состоять из катушек с различными шагами, занимающих различные числа пазов. В принципиальных схемах, приводимых в настоящем параграфе, обмотка изображается в виде однослойной с числом катушечных групп $C=mp'$, выполненных с $q=1$ при низшей скорости вращения. Для более ясного представления специфических особенностей выполнения различных многоскоростных обмоток приведены и рабочие схемы обмоток.

Обмотки с переключением чисел полюсов в отношении 2 : 1. Обмотка двигателя с переключением полюсов в отношении 2 : 1 представляет собой обычную двухслойную обмотку, расположенную при низшей скорости вращения на $^2/_3\tau$. Общее число катушечных групп подобной обмотки $C=p'm$. Переключение чисел полюсов в отношении 2 : 1 может быть осуществлено для любой обмотки, имеющей при низшей скорости вращения двигателя четное число пар полюсов p'. При переключении обмотки на высшую скорость число пар полюсов уменьшится вдвое и будет составлять $p'/2$. Помимо расположения на $^2/_3\tau$, отличие двухскоростной обмотки с переключением полюсов от обычной односкоростной обмотки заключается также и в последовательности соединения отдельных катушечных групп в фазе обмотки. Если пронумеровать катушечные группы в порядке следования по окружности статора, то они распределятся по фазам следующим образом:

I фаза — 1, 4, 7, 10, 13, 16 и т. д.
II фаза — 2, 5, 8, 11, 14, 17 и т. д.
III фаза — 3, 6, 9, 12, 15, 18 и т. д.

В обычном односкоростном двигателе порядок соединения отдельных катушечных групп обмотки в фазе значения не имеет. Для того чтобы в двухскоростном двигателе с переключением чисел полюсов в отношении 2 : 1 переключать обмотку на две различные скорости, необходимо выдержать определенную закономерность в соединениях катушечных групп в фазе обмотки. Переключение полюсов в отношении 2 : 1 осуществляется обычно путем изменения направления тока в половине катушек обмотки. Для этой цели обмотку каждой фазы разбивают на две части, в одну из которых входят все четные катушечные группы, а в другую все нечетные. Изменяя направление тока в одной из частей обмотки каждой фазы, получают вдвое меньшее число полюсов обмотки.

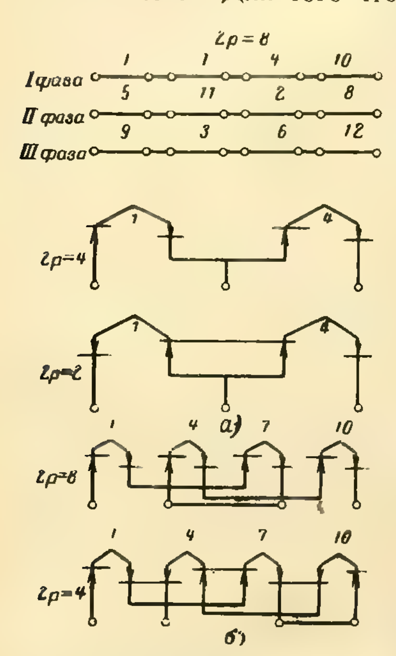


Рис. 1. Принципиальные схемы переключения числа полюсов обмотки фазы в отношении 2 : 1.

На рис. 1,*а* показаны схемы переключения на $^4/_2$ полюса, а на рис. 1,*б* — на $^8/_4$ полюсов при последовательном и параллельном соединении частей обмотки фазы на высшей скорости.

Каждая фаза обмотки с переключением полюсов в отношении 2 : 1 состоит из двух частей, объединяющих четные и нечетные катушечные группы. Эти части между собой могут быть соединены последовательно или параллельно, при различных сопряжениях между фазами на высшей и низшей скоростях вращения. При обмотке, расположенной при $2p'$ полюсах на $^2/_3\tau$, возможны следующие сопряжения фаз: при последовательном сое-

динении — ⅄/⅄, Δ/Δ, ⅄/Δ и Δ/⅄ и при параллельном соединении — ⅄/⅄⅄, Δ/ΔΔ, Δ/⅄⅄, ⅄⅄/Δ, ⅄⅄/⅄ и ⅄/ΔΔ.

Схему соединения обмоток следует выбирать, руководствуясь двумя условиями: заданным режимом работы двигателя на каждой скорости и наименьшим числом переключаемых выводов от обмотки, определяющим габариты и сложность схемы переключателя полюсов.

При переключениях полюсов обмотки в отношении 2 : 1 число выводов на переключатель полюсов колеблется в зависимости от выбранной схемы от 6 до 12; 6 выводов получаются для схем Δ/⅄⅄, ⅄⅄/Δ, ⅄/⅄⅄ и ⅄⅄/⅄, 9 выводов — для схем ⅄/⅄ и ⅄/ΔΔ и 12 выводов — для схем Δ/Δ, ⅄/Δ и Δ/⅄.

Так как соотношения между параметрами многоскоростного электродвигателя, определяемые напряжением на эффективный виток, при схемах Δ/Δ и ⅄/⅄ остаются одинаковыми, а число выводов при схеме ⅄/⅄ на три меньше, чем при схеме Δ/Δ, и схема переключателя полюсов значительно проще, то на практике схема Δ/Δ не применяется. Схема ⅄/⅄ для двухскоростных двигателей применяется также весьма редко, ибо изменением шага обмотки при схемах Δ/⅄⅄ и ⅄⅄/Δ можно достичь с достаточной степенью приближения параметров двигателя, соответствующих схеме ⅄/⅄. Поэтому для двухскоростных двигателей с соотношением скоростей 2 : 1 на практике пользуются лишь схемами Δ/⅄⅄, ⅄⅄/Δ, ⅄/⅄⅄ и ⅄⅄/⅄, при которых переключение полюсов совершается при минимально возможном числе переключаемых выводов от обмотки — 6 и наиболее простой схеме переключателя полюсов. В зависимости от выбранной схемы двигателя с переключением полюсов обмотки в отношении 2 : 1 будут при низшей и высшей скоростях вращения иметь значительно отличающиеся отношения между основными параметрами.

Для переключения полюсов в отношении 2 : 1 в двигателях, работающих в режиме $P=\text{const}$, чаще всего применяются схемы Δ/⅄⅄ и ⅄⅄/Δ, а для работающих в режимах $M=\text{const}$ и $M=\text{var}$ — схема ⅄/⅄⅄. На рис. 2 изображена схема серийного переключателя полюсов барабанного типа для схем обмоток Δ/⅄⅄ и ⅄/⅄⅄. Этот же переключатель может быть использован для схем ⅄⅄/Δ и ⅄⅄/⅄, с тою лишь разницей, что первое положение контактов будет соответствовать высшей скорости вращения, а второе — низшей.

На рис. 3 и 4 приведены рабочие схемы обмоток для переключения полюсов $2p={}^{4}/_{2}$, Δ/⅄⅄ и $2p={}^{8}/_{4}$, Δ/⅄⅄. Сравним мощность, энергетические показатели и другие данные двигателей с различными схемами переключения обмотки. Для работы в режиме $P=\text{const}$ наиболее подходят схемы ⅄⅄/Δ, ⅄/⅄ и Δ/⅄⅄. Произведение $\eta\cdot\cos\varphi$ для всех трех схем при работе двигателя на высшей скорости примерно одинаково. При этом к. п. д. имеет наибольшее значение в схеме Δ/⅄⅄, а $\cos\varphi$ — в схеме ⅄⅄/Δ. Наибольшая мощность, которую без опасения перегрева обмотки способен развить двигатель на высшей скорости, колеблется в пределах от $1{,}2P'$ для схемы ⅄⅄/Δ до $1{,}6P'$ при схеме Δ/⅄⅄. На высшей скорости двигатель работает со сравнительно большим скольжением, особенно при схеме ⅄⅄/Δ. Механическая характеристика двигателя при высшей скорости вращения получается наиболее благоприятной для схемы Δ/⅄⅄. При применении рассмотренных выше схем для режима $P=\text{const}$ двигатель получается недоиспользованным по активным материалам при высшей скорости вращения.

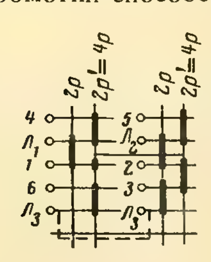


Рис. 2. Схема барабанного переключателя полюсов при $2p=2:1$, Δ/⅄⅄ и ⅄/⅄⅄.

Для работы двигателя в режимах $M=\text{const}$ и $M=\text{var}$ применяется схема ⅄/⅄⅄. По этой схеме при высшей скорости вращения двигатель работает при малых скольжениях и достигает максимально допустимой плотности тока уже при скольжении 3—4%. При $2p$ полюсах двигатель имеет высокое использование активных материалов, что неблагоприятно отражается на $\cos\varphi$, значения которого при высшей скорости вращения получаются меньшими, чем для схем, применяемых для режима $P=\text{const}$. При схеме ⅄/⅄⅄ выполнение двухскоростного двигателя и диаметральным шагом обмотки при низшей скорости вращения на сердечнике обычных односкоростных двигателей затруднительно вследствие чрезмерных индукций и потерь в стали и низкого $\cos\varphi$ при высшей скорости. Поэтому обычно в схемах для режима $M=\text{const}$ и $M=\text{var}$ обмотку выполняют с удлиненным шагом для низшей скорости вращения. Двухскоростные двигатели, работающие в режиме $P=\text{const}$, можно выполнять на сердечниках обычных односкоростных двигателей со ско-

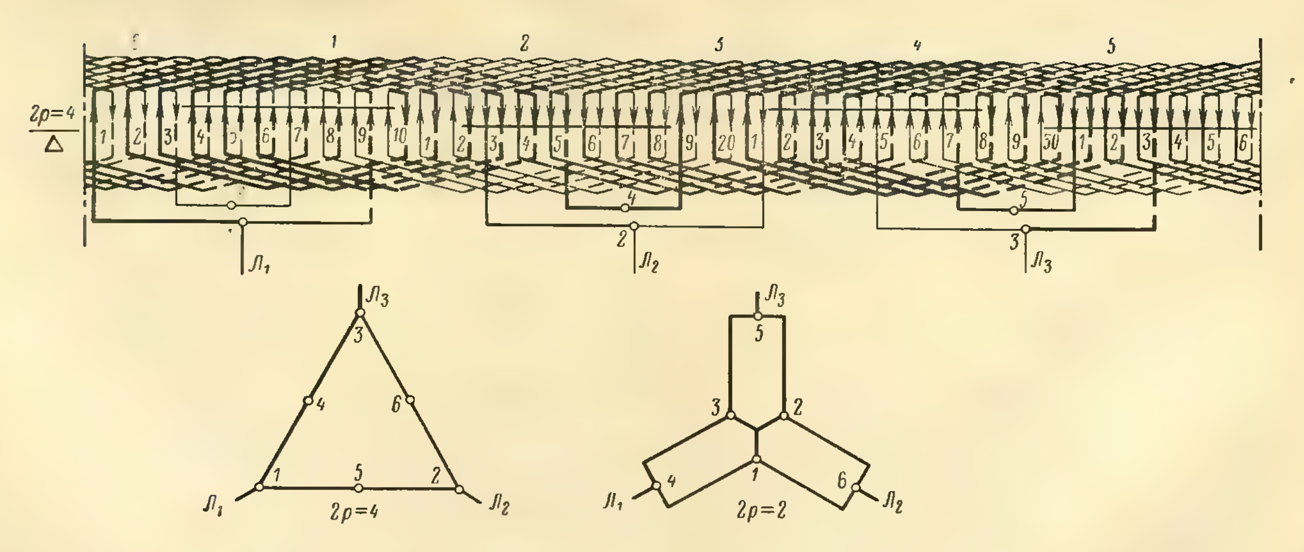


Рис. 3. Рабочая схема обмотки для переключения полюсов $2p=4/2$, △/⅄⅄, $y=1—10(9)$, $z=36$ пазов.

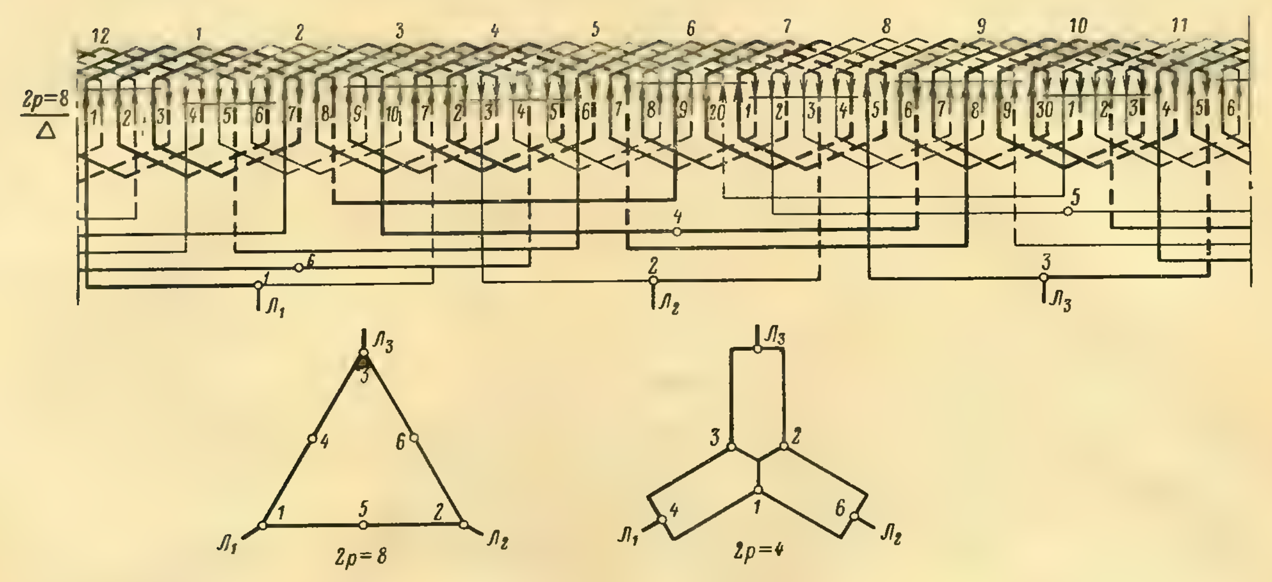


Рис. 4. Рабочая схема обмотки для переключения полюсов $2p=8/4$, △/⅄⅄, $y=1-6(5)$, $z=36$ пазов.

ростью вращения, аналогичной низшей скорости двухскоростного двигателя. Наиболее подходящими для изготовления двухскоростных двигателей, работающих в режиме M=const и особенно M=var, будут односкоростные двигатели с сердечниками, соответствующими меньшему числу полюсов.

При работе двигателя в режиме $P' > P$ следует применять схему ⅄⅄/⅄. При этом режиме работы мощность двигателя при низшей скорости превышает мощность при высшей скорости вращения. При малых скольжениях $\cos\varphi$ имеет по сравнению со схемами для P=const и M=const наибольшие значения. В схеме ⅄⅄/⅄ невозможно полностью использовать на высшей скорости активные материалы двигателя вследствие резкого ухудшения рабочих характеристик двигателя, недопустимо высоких скольжений и резкого падения к. п. д. Пусковые качества двигателя при высшей скорости вращения значительно ухудшаются и удлиняется время разбега. Для обеспечения надежного пуска целесообразно при схеме ⅄⅄/⅄ применять двигатели с ротором с глубокими пазами или с двойной беличьей клеткой. Помимо асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, переключение чисел полюсов в отношении 2 : 1 находит применение и в двигателях с фазным ротором.

Обмотки с переключением чисел полюсов в отношении 8 : 4 : 2. а) **Обмотки с одинаковым шагом по пазам.** Трехскоростная обмотка с переключением числа полюсов в отношении 8 : 4 : 2 может быть получена из двухскоростной с переключением 8 : 4, если на переключатель полюсов вывести дополнительные выводы из мест соединений диаметральных катушечных групп между собой. При восьми полюсах обмотка фазы состоит из четырех катушечных групп, распределенных на две одинаковые части. Каждую часть образуют две катушечные группы, сдвинутые при восьми полюсах на угол 4π друг от друга.

При четырех полюсах отдельные катушечные группы оказываются расположенными на расстоянии 2π друг от друга, поэтому направление тока во всех катушках, входящих в катушечную группу, будет одинаковым (от начала катушек к концам или от концов катушек к началам). Для изменения направления тока в отдельной части обмотки следует лишь изменить подключение объединяемых ею катушечных групп к сети на обратное, так же как и при переключении двухскоростной обмотки.

При дальнейшем переключении обмотки с четырех на два полюса отдельные катушечные группы окажутся сдвинутыми на угол π, и, следовательно, направления токов в них должны быть противоположными. Питая при двух полюсах части обмотки через дополнительный вывод из места соединений катушечных групп, можно в половине катушечных групп направление тока изменить на обратное по сравнению с $2p=8$ и $2p=4$, т. е. в магнитном отношении повернуть их на угол π.

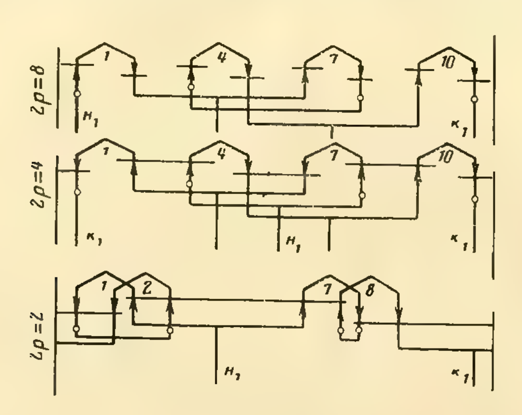


Рис. 5. Переключение полюсов обмотки $2p=8/4/2$.

При $2p=8$ оси катушек обмотки каждой фазы располагались в четырех точках по окружности статора на расстоянии 90°. Подобное же геометрическое расположение осей катушек сохранялось и при $2p=4$.

Для получения двухполюсной обмотки требуется изменить геометрическое расположение осей катушек в фазе таким образом, чтобы катушки по окружности статора располагались лишь в двух точках. Достигается это изменением чередования фаз по окружности статора при $2p=2$ по сравнению с $2p=8$ и $2p=4$. На рис. 5 представлено переключение обмотки на 8/4/2 полюсов. Фазу I при $2p=2$ образуют катушки *1* и *2*, включенные в прямом направлении, и катушки (*—7*) и (*—8*), включенные в обратном направлении, а не катушки *1*, *4*, *7*, *10*, как при $2p=8$ и $2p=4$. При $2p=8$ катушки *2* и *8* принадлежали фазе II и были включены в прямом направлении. Для обычной двухслойной обмотки, выполненной катушками с одинаковым шагом по пазам, для переключения

полюсов в отношении 8 : 4 : 2 требуется максимально 18 выводов на переключатель (выводы от начала, конца и середины каждой из шести катушечных групп).

Часто соединения между фазами обмотки при сопряжениях фаз в звезду и треугольник удается не разрывать, и благодаря этому число выводов на переключатель может быть уменьшено до 15. Обычно обмотка с переключением полюсов 8 : 4 : 2 выполняется с шагом $y = (1{,}1-1{,}2)\frac{z}{8}$ во избежание ухудшения пусковых качеств электродвигателя при $2p=2$. При каждой скорости возможны сопряжения фаз обмотки в звезду, треугольник и звезду — треугольник, когда обмотка фазы частично располагается на луче звезды и частично на стороне треугольника. При $2p=8$ и $2p=4$ наибольшее число возможных параллельных ветвей в фазе составляет 4. При $2p=2$ благодаря уменьшению вдвое числа катушек обмотки число возможных параллельных соединений между катушками в фазе сокращается также вдвое (против $2p=8$ и $2p=4$). При обычных сопряжениях фаз на практике бывает достаточно ограничиться при переключении полюсов в отношении 8 : 4 : 2 соединением обмотки в одну или две параллельные ветви. Дальнейшее приближение к желаемым параметрам двигателя на различных скоростях вращения достигается соответствующим подбором шага обмотки.

На рис. 6 представлена принципиальная схема обмотки X2/8-4-2 Δ/YY/YY, применяемая для режима $P=\text{const}$.

Обмотка состоит из двенадцати катушек. Благодаря тому, что выводы от разных фаз (образующие при $2p=8$ углы треугольника) при $2p=4$ и $2p=2$ не разъединяются, число выводов от обмотки на переключатель полюсов составляет 15. При $2p=8$ фазу I образуют катушки *1, 7, 4, 10,* фазу II — катушки *5, 11, 8, 2*, фазу III — катушки *9, 3, 12, 6*.

При $2p=4$ меняется направление тока в половине обмотки и фазу I образуют катушки *1*, *7*, (*—4*), (*—10*), фазу II — катушки *5, 11,* (*—8*), (*—2*), фазу III — катушки *9, 3*, (*—12*), (*—6*).

При $2p=2$ питание обмотки идет через выводы от середин отдельных частей обмотки с изменением направления тока и распределения по фазам в половине катушек обмотки, фазу I образуют катушки *1, 2,* (*—7*), (*—8*),

фазу II — катушки *5*, *6*, (*—11*), (*—12*), фазу III — *9*, *10*, (*—3*), (*—4*). На рис. 7 приведена рабочая схема обмотки Х 2/8-4-2, Δ/⅄⅄/⅄⅄ для статора с 36 пазами.

б) *Обмотки с различными шагами по пазам.* В рассмотренном выше способе переключения обмотки на $2p=8/4/2$ обмотка выполнялась катушками с одинако-

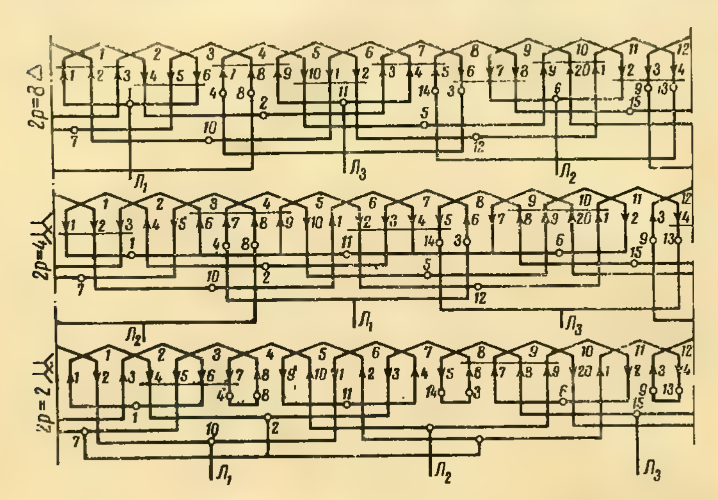


Рис. 6. Принципиальная схема обмотки Х2/8-4-2.

вым шагом по пазам. Автором был предложен новый способ, по которому с целью уменьшения числа выводов обмотка выполняется катушками с различным шагом по пазам. Обмотка состоит из катушек, часть которых выполнена с шагом, равным или близким к $z/8$, т. е. с обычным шагом для $2p=8$, а остальные — с шагом, равным или близким к $3z/8$, т. е. близким к тройному полюсному шагу для низшей скорости. Переключение полюсов обмотки осуществляется только за счет изменения направления тока в катушечных группах, а распределение катушечных групп по фазам при всех числах полюсов не меняется. Благодаря тому, что для всех трех скоростей фазовая принадлежность катушечных групп обмотки остается неизменной, а сопряжения между фазами при всех скоростях не нарушаются, переключение полюсов 8/4/2 по предлагаемому способу возможно осуществить при 9 выводах от обмотки на переключатель полюсов, а переключение полюсов 8/2 — при 6 выводах. При дан-

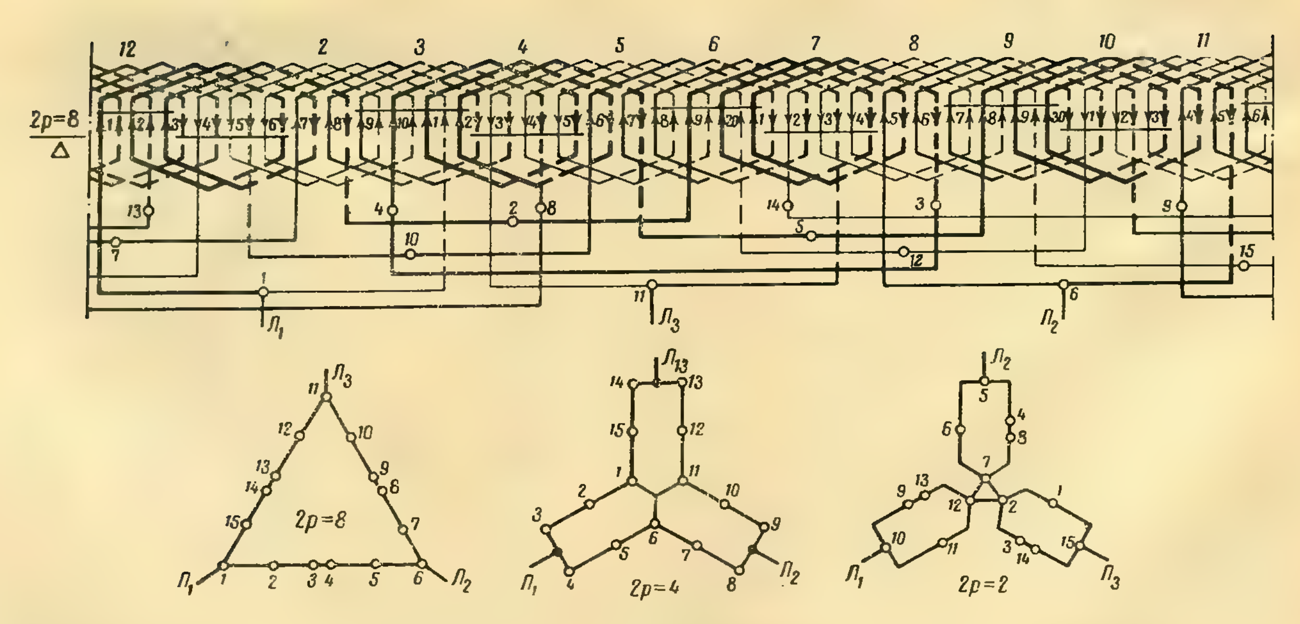


Рис. 7. Рабочая схема обмотки X2/8-4-2.

ном способе получается минимально возможное количество выводов от обмотки по сравнению со всеми известными схемами переключения полюсов в отношении 8 : 4 : 2 и 8 : 2. Следует отметить, что, несмотря на это, для переключения полюсов 8 : 4 : 2 схема переключателя полюсов получается достаточно сложной, а его габариты значительными из-за того, что на каждой скорости в переключениях участвуют все 9 выводов.

Наиболее благоприятными для переключения полюсов по этому способу в отношении 8 : 2 являются схемы обмоток ⅄/⅄⅄ и Δ/⅄⅄. Схема Δ/⅄⅄ наиболее подходит для режима работы двигателя $P=\mathrm{const}$, а схема ⅄/⅄⅄ для режима $M=\mathrm{const}$. В обеих схемах достигается исключительная простота переключения полюсов обмотки в отношении 1 : 4 при числе выводов на переключатель полюсов, не превышающем число выводов в двухскоростной обмотке для отношения чисел полюсов 2 : 1. На рис. 8 приведена схема обмотки Х1/8-2.

Для переключения обмотки по схеме Х1/8-2 может быть использован переключатель для двухскоростного двигателя с переключением числа полюсов 2 : 1 по схемам Δ/⅄⅄ и ⅄⅄/Δ. Рабочая схема Х1/8-2, ⅄/⅄⅄, для $z=36$ пазов приведена на рис. 9. Для переключения чисел полюсов в отношении 8 : 4 : 2 применяется схема ⅄⅄/ΔΔ/ΔΔ с девятью выводами от обмотки на переключатель полюсов. Эта схема может быть применена для режимов $P=\mathrm{const}$ и $M=\mathrm{const}$. Обмотка по схеме Х1/8-4-2 имеет при $2p=8$ обмоточный коэффициент $\kappa=0{,}73$, при $2p=4$ $\kappa=0{,}82$ и при $2p=2$ $\kappa=0{,}67$.

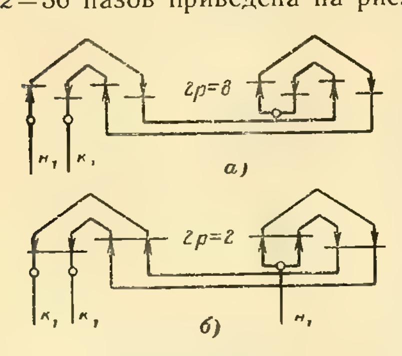


Рис. 8. Принципиальная схема обмотки Х1/8-2.

Обмотки с переключением чисел полюсов в отношении 6 : 4 : 2. Любую m-фазную симметричную шестиполюсную обмотку с расположением обмотки фазы на $^1/_3$ или $^2/_3$ полюсного деления ($q=z/6m$ или $q=z/3m$) можно без разъединений внутри катушечных групп переключать на $2p=4$ и $2p=2$ полюсов, так как сдвигу между группами по окружности статора $6q=z/m$ пазов при

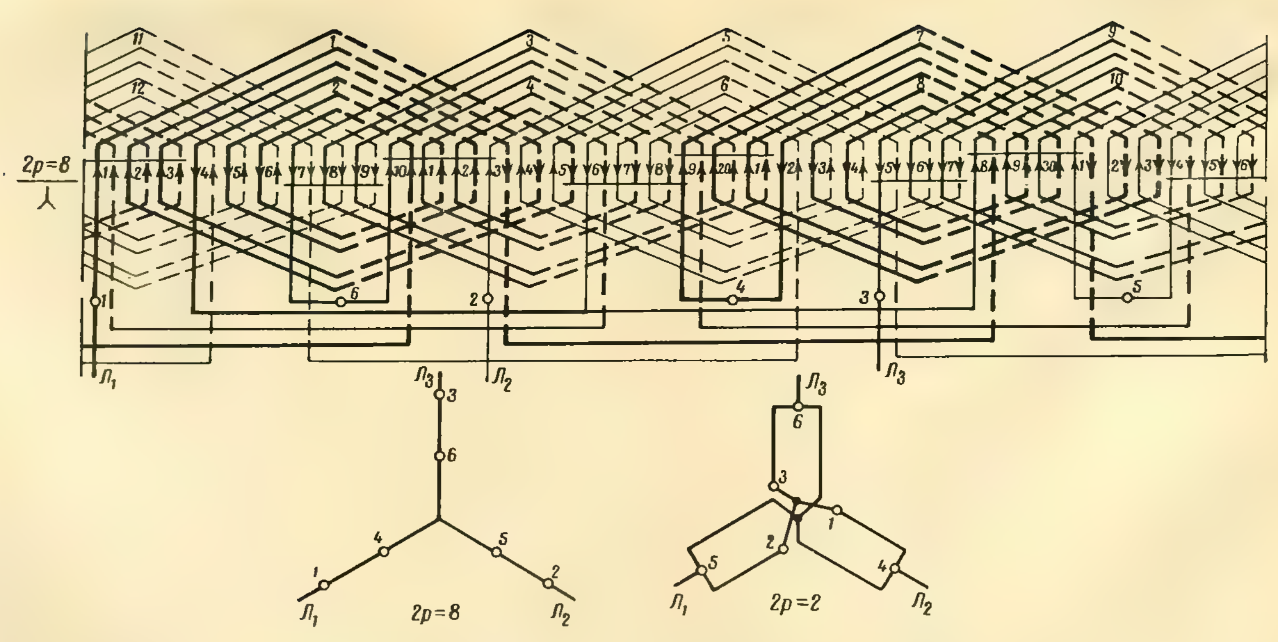


Рис. 9. Рабочая схема обмотки X1/8-2, ⅄/⅄⅄, z=36 пазов.

$2p=2$ будет соответствовать сдвиг на угол $2\pi/m$. Большое количество различных схем обмоток, предложенных для переключения чисел полюсов в отношении 6:4:2, можно разбить на две основные группы в зависимости от q, с которым выполнена обмотка при $2p=6$:

а) обмотка выполнена с $q=z/3m$;

б) обмотка выполнена с $q_1=z/3m$ и $q_2=z/6m$.

Рассмотрим эти схемы применительно к трехфазной обмотке.

а) *Обмотка выполнена с* $q=z/3m$. В этом случае при трехфазном токе имеем двухслойную обмотку, состоящую из $pm=9$ катушечных групп (рис. 10), расположенных при $2p=6$ на $^2/_3\tau$ ($q=z/9$). Оси двух лежащих рядом катушечных групп при $2p=6$ будут сдвинуты между собой на 120°. При переключении на $2p=4$ соседние группы окажутся сдвинутыми друг от друга на 80°. Таким образом, катушечные группы *1*, *4* и *7* будут расположены по отношению друг к другу под углом $80°\cdot3=$ $=240°$.

При $2p=2$ между группами *1*, *4* и *7* угол сдвига будет $\frac{2}{4}\cdot240°=120°$. Следовательно, основное условие для получения симметричной обмотки — расположение отдельных фаз обмотки под углом $2\pi/m$ по отношению друг к другу — в данной обмотке выполнено, и мы на всех числах полюсов получим симметричную трехфазную обмотку. Для переключения $2p=6/4/2$ применяют схемы $\Delta/\Delta/\Delta$ для режима $P=\text{const}$ и $\curlywedge/\Delta/\Delta$ для $M=$ $=\text{const}$. Максимальное число выводов обмотки, нужное для переключения чисел полюсов в отношении 6:4:2, равно 18 (выводы от начала и конца каждой из девяти групп). В зависимости от применяемой схемы число выводов может быть уменьшено. В схемах $\Delta/\Delta/\Delta$ и $\curlywedge/\curlywedge/\curlywedge$ переключение обмотки на три скорости осуществляется при 16

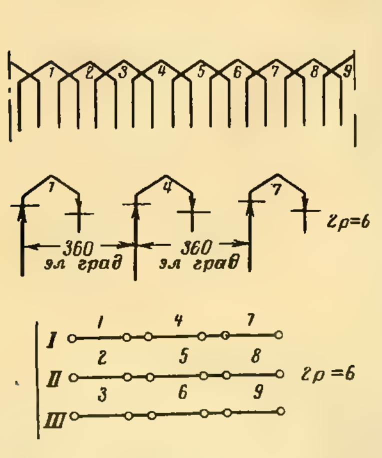


Рис. 10. Вид обмотки $2p=6/4/2$.

выводах на переключатель полюсов, а в схеме ⅄/Λ/Δ — при 15 выводах.

Рассмотрим схему Δ/Δ/Δ (рис. 11), в которой катушечные группы изображены в виде отдельных катушек под порядковыми номерами *1—9*. При $2p=6$ фаза I образуется катушками *1*, *4*, *7*, фаза II — катушками *2*, *5*, *8* и фаза III — катушками *3*, *6*, *9*. При $2p=4$ фазу I образуют катушки *1*, *6*, (*—8*), фазу II — катушки *4*, *9*,

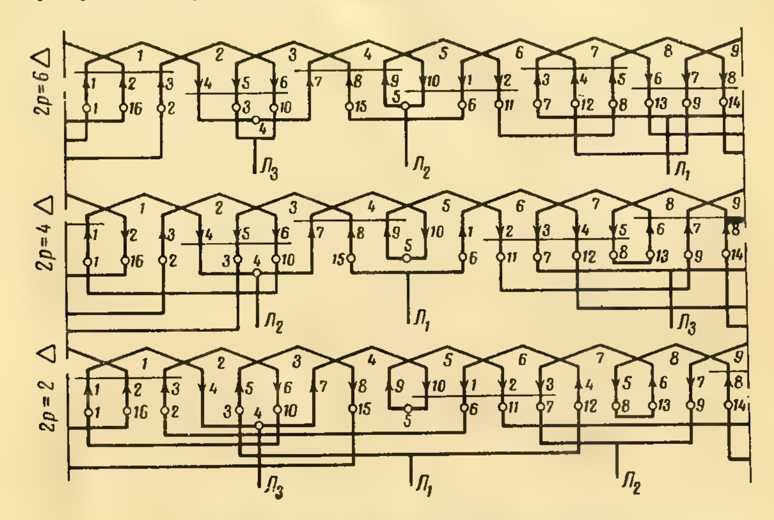


Рис. 11. Принципиальная схема обмотки $2p=6/4/2$, Δ/Δ/Δ.

(*—2*), фазу III — катушки *7*, *3*, (*—5*). При $2p=2$ каждая из фаз обмотки образуется двумя лежащими рядом катушками, включенными в одном направлении, и противолежащей им катушкой, сдвинутой от двойной катушки на угол $8\pi/9$. Таким образом, при $2p=2$ обмотка будет состоять из трех двойных катушек с $q=2z/9$ и трех одинарных катушек с $q=z/9$. Фазу I обмотки образуют катушки *2*, *3* и (*—7*), фазу II — катушки *5*, *6* и (*—1*) и фазу III — *8*, *9* и (*—4*).

Для обмотки с диаметральным шагом для низшей скорости при $2p=6$ обмоточный коэффициент $\kappa=0{,}835$, при $2p=4$ $\kappa=0{,}78$ и при $2p=2$ $\kappa=0{,}48$. При переключении обмотки только с шести на четыре полюса возможно уменьшение шага обмотки при $2p=6$ до $y=0{,}8\tau$. Рассмотренная обмотка с переключением чисел полюсов 6/4/2 представляет собой обычную двухслойную обмотку,

расположенную при $2p=6$ на $^2/_3$ полюсного деления, с обычным сопряжением фаз на различных скоростях.

Рассмотрим обмотку Х1/6-4-2, ⅄⅄⅄/Δ⅄/Δ⅄ (рис. 12), при которой переключение обмотки на три скорости осуществляется при 13 выводах. Обмотка состоит из девяти основных катушечных групп *1 –9* и трех дополнительных — *2а*, *5а*, *8а*. Дополнительные группы выполнены

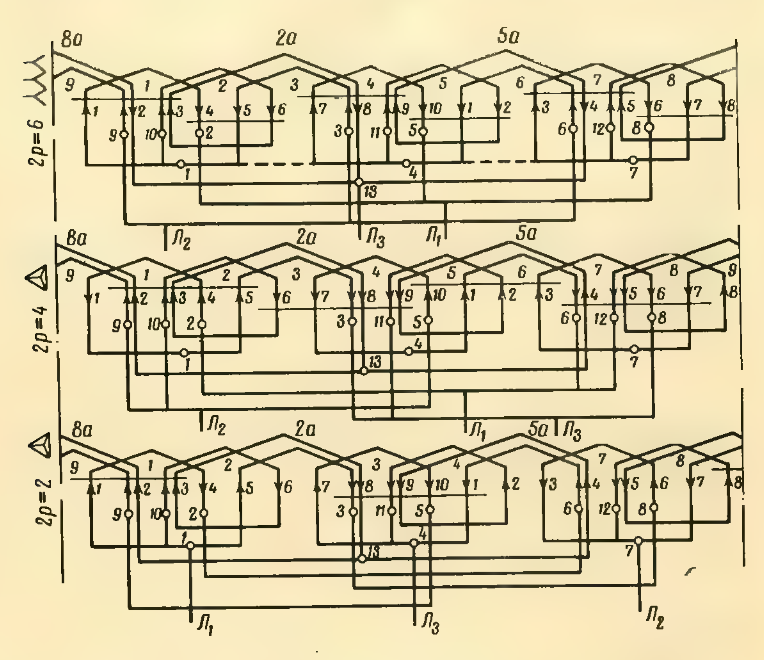


Рис. 12. Принципиальная схема обмотки Х1/6-4-2.

с числом витков, составляющим примерно 10—11% от числа витков основной. Дополнительные катушечные группы при $2p=6$ включены в одну фазу. Шаг дополнительной катушки равен примерно двойному полюсному делению при $2p=6$, что снижает почти до нуля несимметрию токов, которая могла бы возникнуть из-за неодинакового числа витков в фазах. При $2p=4$ и $2p=2$ обмотка каждой фазы распределяется на луче звезды и стороне треугольника смешанного сопряжения звезда — треугольник. Линейный ток, который протекает к какому-либо углу треугольника при соединении обмотки звезда — треугольник, представляет сумму геометриче-

ской разности токов, протекающих по сторонам треугольника, и фазового тока в луче звезды, соединенном с данным углом треугольника.

Так как все катушки обмотки выполнены проводом одинакового сечения, то для удовлетворительной работы двигателя на высших скоростях следует обеспечить условие, чтобы $I_\lambda = I_{ф\Delta}$, т. е. чтобы ток в луче звезды был равен току в стороне треугольника, что достигается при $w_\lambda = 1{,}15 w_\Delta$.

Эксперименты показали, что при $w_\lambda = (1{,}1 - 1{,}2) w_\Delta$ распределение тока в параллельных ветвях практически получается одинаковым и $I_\lambda = I_\Delta = I_ф/2$. Параметры двигателя на различных скоростях вращения, получаемые при схеме $\lambda\lambda\lambda/\Delta\lambda/\Delta\lambda$, близко подходят для режима работы двигателя $P = \text{const}$. При всех скоростях двигатель имеет хорошие энергетические показатели. Обмотка выполняется с укороченным для низшей скорости вращения шагом $y = \frac{z}{6} - 1$. При переключении обмотки только на две скорости $2p = 6/4$ требуется лишь 10 выводов на переключатель полюсов.

б) Обмотка выполнена с $q_1 = z/3m$ и $q_2 = z/6m$. Для получения симметричной обмотки не обязательно, чтобы расположение катушек по окружности статора во всех фазах было одинаково: важно, чтобы была выдержана электрическая симметрия. Предположим, мы имеем трехфазную обмотку на $2p = 6/4/2$, одна фаза которой выполнена катушечными группами с $q = z/3m$. Каждую такую группу можно рассматривать как двойную, состоящую из двух лежащих рядом катушечных групп с $q = z/6m$, сдвинутых по отношению друг к другу на угол π/m. Следовательно, если по отношению к каждой группе с $q = z/6m$ фазы I в двух других фазах можно будет найти катушечные группы, расположенные под углом $120 + 360a$ и $240 + 360a$ градусов, то подобная обмотка будет симметричной, хотя в фазах II и III последовательно соединенные группы не лежат рядом, как в фазе I, а расположены каким-либо другим образом. Этот вывод будет справедлив при условии, что направление тока во всех группах принято одинаковым, например от начала к концу катушки. Если же катушечные группы в фазах II и III включить в противоположном направлении по сравнению с фазой I, то это само по себе создает сдвиг

в 180°, и для получения сдвига между фазами в 120+ +360*a* и 240+360*a* градусов группы в фазах II и III надо будет сдвинуть по окружности статора лишь на 120+180*a* и 240+180*a* градусов.

Подобный принцип получения симметричной обмотки, при котором на низшей скорости многоскоростного двигателя используются прямое и обратное включения катушечных групп, использован в схеме переключения обмотки для $2p=6/4/2$, представленной на рис. 13, на ко-

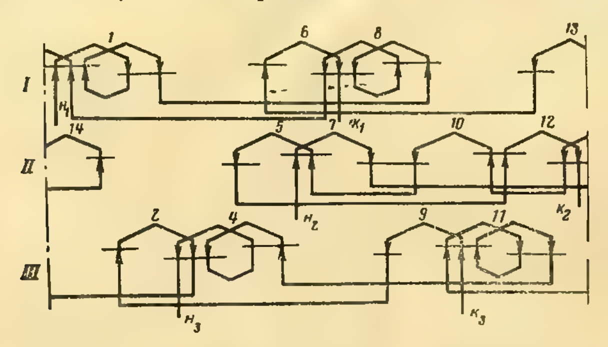


Рис. 13. Расположение катушек обмотки каждой фазы при $2p=6$.

тором показано расположение катушечных групп каждой фазы, изображенных в виде единичных катушек. Особенностью этой схемы является высокое использование активных материалов при низшей скорости вращения. При $2p=6$ для этой скорости вращения с диаметральным шагом обмотки $к=0{,}92$, а при $y=\frac{z}{6}+1$, $к=0{,}89$, т. е. обмоточный коэффициент трехскоростного двигателя при $2p=6$ не отличается от *к* для обычного односкоростного. Для $2p=4$ $к=0{,}72$, а для $2p=2$ $к=0{,}48$. Для переключения полюсов $2p=6/4/2$ требуется 19 выводов на переключатель, что является крупным недостатком этой схемы. Переключение полюсов $2p=6/2$, Δ/Δ благодаря необычному расположению частей обмотки в различных фазах при $2p=6$ может быть осуществлено всего лишь при 10 выводах. Двухскоростная схема $2p=6/2$, Δ/Δ применяется на практике для получения скоростей вращения 3000/1000 *об/мин* и является наиболее простой и эффективной для подобного соотношения скоростей.

Обмотки с переключением чисел полюсов в отношении 8:6:4:2. В обмотках с переключением полюсов в отношении 8:6:4:2 наибольшие затруднения возникают при переключении на шесть полюсов. Переключение полюсов обмотки в отношении 8:4:2 трудностей не вызывает и может быть осуществлено, как уже об этом упоминалось выше, для обычной двухслойной обмотки при 15 выводах на переключатель полюсов и несложной схеме последнего. Число выводов, необходимых для переключения обмотки на $2p=8/6/4/2$ полюсов, составляет 24—27. С целью упрощения переключения предложены следующие способы:

а) переключение обычной двухслойной восьмиполюсной обмотки на $2p=6$ (расположенной при $2p=8$ на $^2/_3\tau$);

б) переключение обмотки, выполненной как обычная шестиполюсная, на восемь полюсов;

в) переключение на $2p=6$ восьмиполюсной обмотки, выполненной катушками с q, соответствующим $2p=6$.

Рассмотрим некоторые схемы с переключением $2p=8/6/4/2$.

а) *Обмотка расположена при $2p=8$ на $^2/_3\tau$.* Подобный способ заключается в том, что обычная трехфазная восьмиполюсная обмотка, расположенная при $2p=8$ на $^2/_3\tau$ и вследствие этого просто переключающаяся на $2p=4$ и $2p=2$, при переключении на $2p=6$ преобразуется в двухфазную и включается Т-образно в трехфазную сеть через специальный трансформатор или непосредственно. Общее количество выводов, необходимых для переключения обмотки на четыре скорости, составляет 18. При непосредственном включении в сеть вследствие неравенства токов в фазах обмотка при $2p=6$ должным образом не может быть использована, что является основным недостатком этого способа.

б) *Обмотка выполнена как шестиполюсная.* Рассматриваемый способ дает возможность при нормальном трехфазном соединении для шести полюсов переключать обмотку на восемь полюсов. По предлагаемому способу для осуществления восьми полюсов из девяти катушек шестиполюсной обмотки каждая фаза образуется двумя сдвинутыми друг относительно друга на $^4/_3\,\pi$ катушечными группами и лежащей между ними группой при включении ее в обратном направлении или группой, лежащей против них и сдвинутой на $^4/_3\,\pi$ или $^8/_3\,\pi$, при включении

ее в том же направлении, что и основные катушечные группы. При этом π берется для шестиполюсной обмотки.

в) *Обмотка выполнена при $2p=8$ с q, соответствующим $2p=6$.* По этому способу обмотка при $2p=8$ состоит из $4m$ катушечных групп, из которых половина выполнена с q_1, вдвое большим, чем q_2, с которым выполнена другая половина групп. Таким образом, в отношении общего числа катушечных групп обмотки рассматриваемая обмотка не отличается от обычной восьмиполюсной обмотки, расположенной на $^2/_3\tau$. При этом среднее значение q для обмотки при $2p=8$ будет:

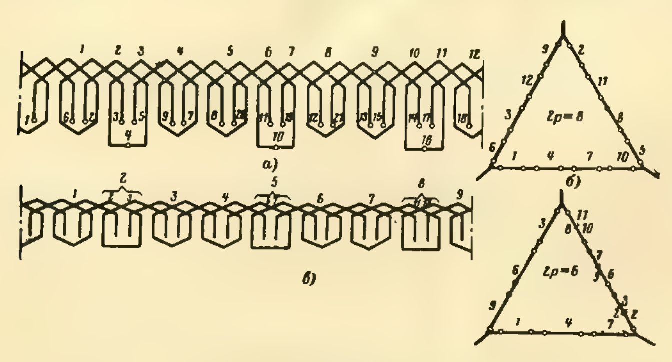


Рис. 14. Обмотка X2/8-6-4-2.
а — расположение в пазах; *б* — соединение при $2p=8$; *в* — соединение при $2p=6$.

$$q_{ср}=\frac{1}{2}\left(\frac{z}{3m}+\frac{z}{6m}\right)=\frac{z}{4m}.$$

Чередование групп по окружности статора следующее: q_1, q_1, q_2, q_2, q_1, q_1 и т. д. Подобное чередование катушечных групп дает возможности при $2p=6$ объединить две лежащие рядом группы с $q_2=z/6m$ в одну с $q_1=z/3m$ и получить симметричную при шести полюсах обмотку, состоящую из девяти катушечных групп с $q_1=z/3m$, в которой каждая группа расположена при $2p=6$ на $^2/_3\tau$. Схема обмотки изображена на рис. 14, для $z=36$ пазов.

Обмотка состоит из 12 катушечных групп, имеющих порядковые номера *1*—*12*, из которых шесть групп — *1*, *4*, *5*, *8*, *9* и *12* — имеют $q=\frac{36}{9}=4$, а шесть групп *2*, *3*, *6*, *7*, *10* и *11* имеют $q=\frac{36}{18}=2$. При восьми полюсах (рис. 14,*а*)

фазу I обмотки образуют катушечные группы *1, 4, 7, 10*, фазу II — группы *2, 5, 7, 11* и фазу III — группы *3, 6, 9* и *12*. Соединение катушечных групп при $2p=8$ представлено на рис. 14,*б*. На рис. 14,*в* показано соединение обмотки при $2p=6$, при котором по две катушечные группы с $q=2$, т. е. *2* и *3*, *6* и *7*, *10* и *11*, объединяются в одну с $q=4$. Следовательно, обмотка при $2p=6$ будет состоять из девяти катушечных групп с $q=4$, расположенных на $^2/_3$ полюсного деления.

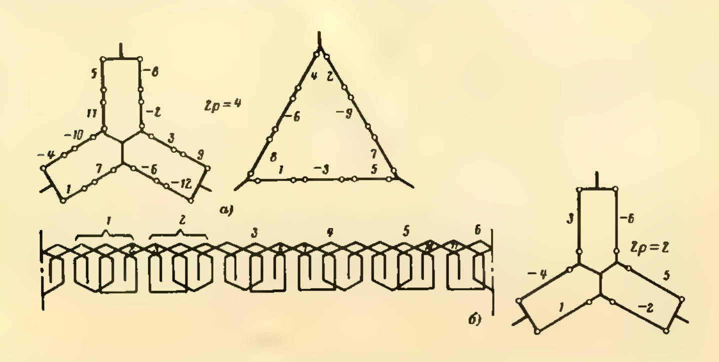


Рис. 15. Обмотка Х2/8-6-4-2.
а — соединение катушек при $2p=4$; *б* — соединение катушек при $2p=2$.

На рис. 15,*а* представлена схема обмотки при $2p=4$. Переключение чисел полюсов с восьми на четыре достигается переменой направления тока в половине катушечных групп, на что указывает знак минус, стоящий рядом с порядковым номером группы. Направление тока при $2p=4$ изменено по сравнению $2p=8$ в катушках *2, 4, 6, 8, 10* и *12*, т. е. во всех четных катушечных группах обмотки. При $2p=4$ возможно и другое включение обмотки, когда каждая фаза четырехполюсной обмотки образуется тремя катушечными группами шестиполюсной обмотки, принадлежавшими при шести полюсах к различным фазам. Переключение обмотки на $2p=2$ представлено на рис. 15,*б*. Для получения двухполюсной обмотки восьмиполюсная обмотка, состоящая из 12 катушечных групп, преобразуется таким образом, что две лежащие рядом группы при $2p=8$ с $q=4$ и $q=2$ объединяются в одну с $q=6$. В этом случае обмотка состоит из шести катушечных групп с $q=6$.

По рассмотренному способу переключение $2p=8/6/4/2$ осуществляется при 21 выводе на переключатель полюсов, переключение $2p=8/6/4$ — при 18 выводах и переключение $2p=8/6$ — при 14 выводах. Наиболее подходит для использования при режиме работы двигателя $P=\text{const}$ сопряжение фаз для $2p=8/6/4/2$, Δ/Δ/⅄⅄/⅄⅄. Для использования при режимах $M=\text{const}$ и $M=\text{var}$ подходят схемы ⅄/Δ/Δ/Δ, ⅄/Δ/Δ/⅄⅄ и ⅄/Δ/⅄⅄/⅄⅄. В рассмотренной обмотке половина групп при $2p=8$ имеет $q_1=z/3m$, а другая половина — $q_2=\frac{z}{6m}=\frac{q_1}{2}$.

Возможны некоторые видоизменения подобной обмотки, а именно:

а) большая часть обмотки при $2p=8$ выполняется с $q_1=z/6m$, а меньшая часть с $q_2=z/3m$;

б) обмотка при $2p=8$ полностью выполняется катушечными группами с $q=z/6m$.

Однако при указанных видоизменениях переключение обмотки на четыре скорости вращения осуществляется при большем количестве переключений выводов и более сложном переключателе полюсов, хотя при этом обмотка приобретает ряд преимуществ в смысле повышения обмоточного коэффициента при низших скоростях вращения $2p=8$ и $2p=6$ и увеличения количества возможных переключений на различных скоростях. Если выполнить обмотку из $6m$ катушечных групп, соединив между собой диаметрально расположенные группы, и из мест соединений диаметральных групп взять дополнительные выводы на переключатель полюсов, то полученные девять катушечных групп с 27 выводами на переключатель полюсов от начала, середины и конца каждой группы позволяют осуществить переключение обмотки на $2p=8/6/4/2$. В зависимости от того, возможно ли сохранить без разрывов соединения между отдельными катушечными группами при всех скоростях вращения, число необходимых для переключения выводов может быть уменьшено. Например, если сохраняются соединения катушечных групп, обусловленные при всех скоростях сопряжениями фаз обмотки, то общее число выводов уменьшится до 24. Катушечные группы обмотки с $q=z/6m$ при $2p=8$ будут располагаться на $^4/_9m$ части полюсного деления, т. е. менее чем на $\tau/2$. Подобное распределение обмотки на полюсном делении определяет повышенные значения коэффициента распределения об-

мотки k_p по сравнению с обычной многоскоростной обмоткой, распределенной при $2p=8$ на $^2/_3\tau$ по крайней мере при двух низших скоростях вращения. Например, для трехфазной обмотки при $2p=8$ $k_p=0{,}94$, т. е. по существу не отличается от k_p односкоростной обмотки. При $2p=6$ обмотка распределяется на $^1/_3\,\tau$, и k_p в этом случае совпадает с k_p обычной трехфазной обмотки. Главным недостатком схемы является наличие слишком большого числа включенных выводов обмотки на всех скоростях.

5. ПЕРЕДЕЛКА ОДНОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В МНОГОСКОРОСТНЫЕ

Как правило, переделка односкоростных двигателей в многоскоростные сводится лишь к перемотке статорной обмотки по новым обмоточным данным. В практике работы электроремонтных заводов, мастерских и электроцехов промышленных предприятий подобные переделки встречаются довольно часто. При перемотке односкоростных двигателей на многоскоростные при соотношениях между высшей и низшей скоростями вращения 2 : 1 и больших следует применять только двухслойную обмотку. При однослойной обмотке кривая поля при высших скоростях вращения сильно искажается, высшие гармоники в ней достигают значительной величины и их взаимодействие с основной гармоникой поля создает в некоторых случаях тормозящие моменты, противодействующие моменту вращения двигателя. Поэтому при высших скоростях вращения в механической характеристике двигателя возникают провалы и двигатель может не развернуться до своей синхронной скорости, а «застрять на какой-то промежуточной скорости. Ток в обмотке двигателя при этом по своей величине близок к току короткого замыкания. При двухслойной обмотке механические характеристики двигателя при высших скоростях значительно улучшаются, а пусковая характеристика двигателя на низшей скорости почти не ухудшается. Дальнейшее улучшение пусковых характеристик асинхронного многоскоростного двигателя на высших скоростях достигается применением обмотки с удлиненным шагом для низшей скорости вращения. В отношении подбора желаемых индукций для каждой скорости вра-

щения двухслойная обмотка также более удобна, чем однослойная, так как ее можно выполнить с любым шагом по пазам. При соотношениях скоростей 3:2 и меньших наряду с двухслойной может быть применена и однослойная обмотка.

Методика электрического расчета. Прежде всего по заводской табличке или по каталогу необходимо установить технические данные односкоростного двигателя: мощность P, фазовое напряжение U, сопряжение фаз, фазовый ток I, скорость вращения $\cos\varphi$ и к. п. д. Затем определяют основные размеры и обмоточные данные двигателя, необходимые для пересчета:

1. Наружный диаметр активной стали статора $D_{нар}$, *мм*.
2. Внутренний диаметр активной стали статора $D_{вн}$, *мм*.
3. Длина пакета статора l, *мм*.
4. Число пазов статора z.
5. Площадь паза статора F, *мм*^{2}.
6. Ширина зубца статора b_z, *мм*.
7. Высота ярма статора h_j, *мм*.
8. Число эффективных проводов в пазу s_n.
9. Число параллельных ветвей обмотки $2a$.
10. Диаметр провода голого (с изоляцией) $d_{гол}$, $d_{из}$, *мм*.
11. Сечение провода голого (с изоляцией) $Q_{гол}$, $Q_{из}$, *мм*^{2}.
12. Средняя длина одного витка $l_{ср}$, *м*.
13. Число пазов, занимаемых одной стороной катушки, q.
14. Шаг обмотки y.

На основании основных размеров и обмоточных данных определяются:

1) плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I}{Q_{гол}},\ а/мм^2; \qquad (12)$$

2) удельная нагрузка

$$AS = \frac{I s_n z}{2a\pi D_{нар}},\ а/мм; \qquad (13)$$

3) произведение плотности тока на удельную нагрузку

$$\Delta AS = \frac{I^2 s_n z}{Q_{гол} 2a\pi D_{нар}},\ а^2/мм^3; \qquad (14)$$

4) число последовательных витков в фазе

$$w = \frac{s_n z}{12a}; \tag{15}$$

5) сопротивление фазы статора в нагретом состоянии

$$R = \frac{w l_{ср}}{46 \cdot 2a Q_{гол}}, \text{ ом}; \tag{16}$$

6) полюсное деление статора

$$\tau = \frac{D_{вн} \pi}{2p}, \text{ мм}; \tag{17}$$

7) зубцовый шаг статора

$$t = \frac{3{,}14 D_{вн}}{z}, \text{ мм}; \tag{18}$$

8) обмоточный коэффициент κ;

9) индукция в воздушном зазоре для обычной сети 50 *гц*

$$B_\delta = \frac{(U - IR)\, 10^8}{1{,}44 l \tau w \kappa}, \text{ гс}^*; \tag{19}$$

10) индукция в зубце статора

$$B_z = \frac{B_\delta t}{0{,}93 b_z}, \text{ гс}; \tag{20}$$

11) индукция в ярме статора

$$B_j = \frac{0{,}35 \tau B_\delta}{h_j}, \text{ гс}; \tag{21}$$

12) коэффициент заполнения паза обмоткой

$$\kappa_{зап} = \frac{s_n Q_{из}}{F}. \tag{22}$$

При переделках односкоростных двигателей в многоскоростные возможны три случая:

1) низшая скорость многоскоростного двигателя совпадает со скоростью вращения односкоростного;

2) низшая скорость многоскоростного двигателя меньше скорости односкоростного;

3) низшая скорость многоскоростного двигателя больше скорости односкоростного.

---

* При подсчете э. д. с. следовало бы пользоваться формулой $U = IR \cos\varphi - IX \sin\varphi$. Однако при малых углах φ достаточно использованное приближение $U - IR$. В международной системе единиц СИ единицей магнитной индукции является тесла (*тл*); 1 *гс* $= 10^{-4}$ *тл*.

На практике встречаются только с первыми двумя случаями, так как на сердечнике односкоростного двигателя, скорость которого меньше низшей скорости многоскоростного, обычно невозможно получить удовлетворительно работающий многоскоростной двигатель. Исключения возможны лишь в многополюсных двигателях. Если низшая скорость вращения многоскоростного двигателя совпадает со скоростью переделываемого односкоростного (например, при переделке односкоростного двигателя 1 500 *об/мин* в многоскоростной 1 500/3 000 *об/мин* или двигателя 1 000 *об/мин* на 1 000/1 500/3 000 *об/мин* и т. д.), для многоскоростного двигателя можно оставить те же самые плотность тока в обмотке и индукцию в воздухе, которые были у односкоростного двигателя (при условии, что на высшей скорости индукция в ярме статора не превысить допустимых пределов). В этом случае число последовательных витков в фазе многоскоростного двигателя при низшей скорости вращения выбирается так, чтобы числа эффективных витков в фазе wk односкоростного и многоскоростного двигателей были приблизительно одинаковыми.

Следует иметь в виду, что обмоточный коэффициент многоскоростного двигателя, как правило, меньше обмоточного коэффициента односкоростного, поэтому требуется соответственное увеличение числа витков. Например, в двухскоростных двигателях с переключением скоростей в отношении 1 : 2 расположение обмотки статора на $^2/_3$ полюсного деления, давая выигрыш в простоте переключения, ведет к уменьшению k многоскоростной обмотки, сравнительно с односкоростной примерно на 10—15%. Таким образом, при одном и том же напряжении сети и одинаковой индукции воздушного зазора при переделке односкоростного двигателя в многоскоростной следует увеличить w приблизительно на 10—15%, что влечет за собой соответственное снижение мощности, так как необходимо в пазу поместить большее число проводов. Иногда при перемотке возможно несколько увеличить заполнение паза проводом сравнительно с односкоростным серийным исполнением и за этот счет уменьшить снижение мощности многоскоростного двигателя. Возможное увеличение заполнения паза обычно составляет не более 5%, поэтому при равенстве низшей скорости вращения многоскоростного двигателя и скорости переделываемого односкоростного мощность переделанного

многоскоростного двигателя сравнительно с односкоростным уменьшится примерно на 5—10%. В некоторых схемах для двухскоростных двигателей с соотношением чисел полюсов, отличным от 1 : 2 (например, 6 : 2 и др.), обмоточный коэффициент многоскоростного двигателя по сравнению с односкоростным не снижается. В то же время имеются многоскоростные обмотки, в которых обмоточный коэффициент снижается более чем на 20%.

Для двигателей с переключением полюсов обмотки 1 : 2 в схемах, применяемых обычно для режима $P=\text{const}$, мощность многоскоростного двигателя при низшей скорости вращения будет составлять примерно 0,85—0,95 от мощности одинакового по скорости односкоростного двигателя того же габарита, повышаясь до 1,2—1,5 мощности односкоростного двигателя при высшей скорости.

Если же односкоростной двигатель переделать в многоскоростной так, чтобы низшая скорость вращения многоскоростного двигателя была меньше, чем скорость выбранного для переделки односкоростного двигателя (например, двигатель на 1 500 *об/мин* переделать на многоскоростной 750/1 500 *об/мин* или 750/1 000/1 500 *об/мин* и т. д.), то индукцию воздушного зазора следует снизить на 10—15%, иначе ток холостого хода в многоскоростном двигателе при низшей скорости может возрасти до недопустимой величины, иногда превышающей номинальный ток двигателя. Плотность тока в обмотке статора в некоторых случаях также приходится снижать, так как ухудшаются условия охлаждения двигателя. Таким образом, мощность многоскоростного двигателя при низшей скорости вращения сравнительно с мощностью переделываемого односкоростного двигателя снизится по следующим причинам:

а) из-за уменьшения скорости вращения;
б) за счет снижения индукции воздушного зазора;
в) за счет уменьшения обмоточного коэффициента;
г) за счет уменьшения энергетических показателей;
д) за счет ухудшения вентиляции.

Повышение же мощности многоскоростного двигателя возможно за счет увеличения заполнения площади паза обмоткой и применения провода с более тонкой изоляцией. В общем, при переделке односкоростного двигателя с $2p=4$ на многоскоростной с наибольшим числом полюсов $2p=6$ мощность при $2p=6$ составит:

$$P_{\text{многоск}}=(0{,}5—0{,}6)\,P_{\text{односк}}.$$

Примерно такое же соотношение между мощностями сохранится и при переделке двигателя с $2p=6$ на многоскоростной с наибольшим числом полюсов $2p=8$.

При некоторых схемах переключения обмотки эти многоскоростные двигатели способны развивать при высоких скоростях вращения значительно большую мощность, чем та, которая определяется повышением скорости вращения. Благодаря лучшим условиям охлаждения двигателя при высших скоростях вращения плотность тока в обмотке статора может быть увеличена на 30—40% сравнительно с низшей скоростью, а индукция в ярме статора доведена до 18 000—19 000 *гс*. После выяснения основных величин, характеризующих односкоростной двигатель, подбирают из известных или составляют вновь схему обмотки, которая наиболее подходит к заданным мощностям многоскоростного двигателя при различных скоростях вращения. На основании выбранной схемы находят шаг y, число пазов на полюс и фазу q и среднюю длину витка обмотки $l_{ср}$. По выбранному шагу и распределению обмотки на полюсном делении для каждого числа полюсов определяется обмоточный коэффициент k.

С целью упрощения подсчета k для наиболее часто встречающихся двигателей с 36 пазами на статоре в табл. 1 приведены обмоточные коэффициенты для обмоток с числами полюсов от $2p=12$ до $2p=2$ в зависимости от расположения обмотки на полюсном делении и укорочения шага при $z=36$ пазов. Затем, задаваясь индукцией воздушного зазора, плотностью тока при низшей скорости вращения, ориентировочным активным падением напряжения в обмотке статора IR и определив величину полюсного деления τ при низшей скорости вращения, находят число последовательных витков обмотки в фазе

$$w=\frac{(U-IR)\,10^8}{1{,}44 l\tau B_\delta k}, \qquad (23)$$

по которому определяют число проводов в пазу $s_п$. Задаваясь числом параллельных ветвей обмотки $2a$ и выбирая коэффициент заполнения паза $k_{зап}$, находят сечение провода с изоляцией:

$$Q_{из}=\frac{Fk_{зап}}{2as_п},\ мм^2. \qquad (24)$$

В зависимости от выбранной марки обмоточного провода определяют диаметр, а затем сечение голого провода. По сечению провода, числу параллельных ветвей и плотности тока находят ток в фазе обмотки:

$$I = 2a\, Q_{гол}\, \Delta,\ a. \qquad (25)$$

Активное сопротивление нагретой фазы обмотки определяется по формуле (16). Уточнив число витков при низшей скорости вращения и определив в зависимости от выбранной схемы и соотношения между числами полюсов обмоточные коэффициенты и размеры полюсных делений на высших скоростях, находят индукцию воздушного зазора и индукцию в ярме статора двигателя при высших скоростях вращения. Если при какой-либо из высших скоростей вращения B_j превышает 19 000 *гс,* следует снизить B_δ при низшей скорости или изменить схему обмотки так, чтобы снизить B_j, иначе при этой скорости вращения сильно возрастет ток холостого хода и снизится $\cos\varphi$.

Проверку индукции в зубцах статора B_z по формуле (20) следует производить лишь в том случае, если значение B_δ при каком-либо числе полюсов обмотки превосходит B_δ переделываемого серийного односкоростного двигателя. Полезная мощность двигателя при различных скоростях вращения определяется по формуле

$$P = UI\eta \cos\varphi \cdot 10^{-3},\ квт. \qquad (26)$$

Значения η и $\cos\varphi$ выбирают на основании каталожных данных, аналогичных по исполнению, мощности и скорости вращения асинхронных двигателей. В многоскоростных двигателях мощностью до 5 *квт* при $2p = 8$ и ниже в зависимости от схемы обмотки произведение $\eta \times \cos\varphi$ при высших скоростях вращения может превосходить в 1,5—2 раза $\eta \times \cos\varphi$ при низшей скорости, что позволяет увеличить мощность двигателя при высших скоростях. Существенное увеличение мощности двигателя при высших скоростях может быть также достигнуто повышением плотности тока в обмотке статора.

Ниже приводятся примеры переделок односкоростных двигателей в многоскоростные, а также переделок серийных двухобмоточных многоскоростных двигателей на однообмоточные. Все выполненные расчеты базируются на использовании сердечников электродвигателей общего применения единых серий А и А2, составляющих по-

давляющее большинство в нашем народном хозяйстве. Это обстоятельство позволяет использовать указанные расчеты в практической деятельности электроремонтных заводов и мастерских.

Пример 1. Переделка односкоростного электродвигателя типа АОЛ2-21-6 на двухскоростной 750/1 500 *об/мин*, P=const.

Технические данные двигателя АОЛ2-21-6: 0,8 *квт*; 220/380 *в*; 4,0/2,3 *а*; 930 *об/мин*; $\eta=0{,}73\%$; $\cos\varphi=0{,}71$;

$I_{пуск}/I_{ном}=6{,}5$; $M_{нач}/M_{ном}=1{,}8$; $M_{макс}/M_{ном}=2{,}2$.

Основные размеры:

$D_{нар}=153$ *мм*;
$D_{вн}=98$ *мм*;
$D_{рот}=97{,}5$ *мм*;
$D_{вала}=30$ *мм*;
$l_1=70$ *мм*;
$l_2=72$ *мм*;
$z_1=36$ пазов;
$z_2=26$ пазов;
$F_{св}=93{,}8$ *мм*^{2} (в свету);
$F_{из}=72$ *мм*^{2} (с изоляцией);
$b_z=4{,}7$ *мм*;
$h_j=9{,}7$ *мм*.

Обмоточные данные: обмотка однослойная; $y=1-8(7)$ и $2-7(5)$; $s_n=85$; провод марки ПЭТВ, ∅ 0,67/0,745 *мм*; $2a=1$; соединение катушек последовательное; $q=2$; $l_{ср}=0{,}322$ *м*; $l_{лоб.части}=$ $=0{,}192$ *м*; $R_{ф15°C}=7{,}8$ *ом*; $G_м=1{,}74$ *кг*.

Проверочный расчет односкоростного двигателя.

1. $\Delta=\frac{2,3}{0,373}=6{,}17$ *а/мм*^{2}.

2. $AS=\frac{2,3\cdot85\cdot36}{3,14\cdot98}=228$ *а/см*.

3. $\Delta AS=6{,}17\cdot228=1\,410$ *а*^{2}*/мм*$^2\cdot$*см*.

4. $w=\frac{85\cdot36}{6}=510$ витков.

5. $R=7{,}8\cdot1{,}24=9{,}7$ *см*.

6. $\tau=\frac{9,8\cdot3,14}{6}=51{,}3$ *мм*.

7. $t=\frac{98\cdot3,14}{36}=8{,}55$ *мм*.

8. $k=0{,}96$ (находим по табл. 1 для $2p=6$, $y=6$ и $q=2$).

9. $B_\delta=\frac{(220-2,3\cdot9,7)\cdot10^8}{1,44\cdot7,1\cdot51,3\cdot510\cdot0,96}=7\,700$ *гс*.

10. $B_z=\frac{7\,700\cdot8,55}{0,95\cdot4,7}=14\,800$ *гс*.

11. $B_j=\frac{0,35\cdot51,3\cdot7\,700}{9,7}=14\,300$ *гс*.

Расчет двухскоростного двигателя. Из сказанного выше следует, что при переделке односкоростного электродвигателя с $2p=6$ на многоскоростной с наибольшим числом полюсов $2p=8$ последний будет при 750 *об/мин* иметь полезную мощность, приблизительно равную 0,5—0,6 мощности односкоростного, т. е. 0,4—0,5 *квт.* Переделку двигателя производим на напряжение 220 *в.*

а) $2p=8$. Выбираем для переключения полюсов $2p=8/4$ схему Δ/⅄⅄ с 6 выводами на переключатель полюсов, наиболее подходящую для режима $P=\text{const}$.

Берем двухслойную обмотку с расположением на $2/3\,\tau$, с удлиненным шагом при $2p=8$ $y=1-6(5)$. Схема такой обмотки представлена на рис. 4.

Для двухслойной обмотки, расположенной на $^2/_3\tau$, число пазов занимаемых стороной катушки (число пазов на полюс и фазу), $q=\frac{z}{pm}$. В нашем случае $q=\frac{36}{3\cdot 4}=3$.

По табл. 1 находим для $y=1-6(5)$ и $q=3$ обмоточные коэффициенты при $2p=8$ и $2p=4$, соответственно равные 0,83 и 0,73. При увеличении числа полюсов асинхронного двигателя ток при холостом ходе в процентном отношении к номинальному увеличивается. Во избежание чрезмерного повышения тока холостого хода и связанного с этим ухудшения технических данных целесообразно снизить индукцию в воздушном зазоре. Принимаем при $2p=8$ $B_\delta=7\,000$ *гс.* Принимаем ориентировочно $IR=30$ *в.*

Находим число последовательных витков в фазе при $2p=8$ и число проводов в пазу:

$$w=\frac{(220-30)10^8}{1,44\cdot 71\cdot 38,5\cdot 7\,000\cdot 0,83}=830 \text{ витков};$$

$$s_п=\frac{2w\cdot 3}{z}=\frac{830\cdot 6}{36}=138 \text{ проводов}.$$

Принимая коэффициент заполнения паза обмоткой $k_{зап}=0,72$, определяем диаметр изолированного провода:

$$d_{из}=\sqrt{\frac{F_{из}k_{зап}}{2as_п}}=\frac{71\cdot 0,72}{1\cdot 138}=0,61 \text{ мм}.$$

При марке провода ПЭВ-2 или ПЭТВ $d_{гол}=0,55$ *мм.* Находим сечение голого провода и сопротивление обмотки статора в нагретом состоянии:

$Q_{гол}=0,237$ *мм²*;

$$R=\frac{830\cdot 0,3}{46\cdot 0,237}=23 \text{ ом}.$$

Принимаем $\Delta=5,5$ *а/мм²*.

Ток в фазе $I=5,5\cdot 0,237=1,3$ *а.*

Линейная нагрузка $AS=\frac{1,3\cdot 137\cdot 36}{3,14\cdot 98}=210$ *а/см*;

$$\Delta AS=5,5\cdot 210=1\,150 \text{ а}^2/\text{мм}^2\cdot\text{см}.$$

Принимая во внимание, что снижение скорости вращения переделанного двигателя ухудшает его охлаждение, полученное значение

$\Delta AS=1\,150$, меньшее по своей величине по сравнению с исходным при $2p=6$ ($\Delta AS=1\,410$), следует признать допустимым. Известно, что в обмотке статора асинхронного двигателя выделяется наибольшая часть потерь энергии. Поэтому сравнение этих потерь при $2p=6$ и $2p=8$ позволяет судить о степени нагрева обмотки двигателя:

при $2p=6$ $\quad 3I^2R=3\cdot 2{,}3^2\cdot 9{,}7=155$ *вт.*

при $2p=8$ $\quad 3I^2R=3\cdot 1{,}3^2\cdot 23=117$ *вт.*

Следовательно, ухудшение вентиляции двигателя компенсируется снижением потерь в статорной обмотке более чем на 30%; это гарантирует, что нагрев обмотки двигателя не превысит допустимых пределов. Примем при $2p=8$ произведение $\eta\cos\varphi=0{,}52$ (на 10% меньше, чем при $2p=6$). Тогда полезная мощность двигателя при 750 *об/мин*

$$P=3\cdot 220\cdot 1{,}3\cdot 0{,}52\cdot 10^{-3}=0{,}45 \text{ квт.}$$

б) $2p=4$. При выбранной схеме переключения полюсов Δ/⅄⅄ на высшей скорости обмотка двигателя будет включена в две параллельные цепи. При этом напряжение сети будет превосходить фазовое напряжение обмотки в 1,73 раза. Таким образом, число последовательных витков в фазе обмотки при $2p=4$ по сравнению с $2p=8$ уменьшится в 2 раза, а фазное напряжение снизится с 220 до 127 *в*. Так как скорость вращения переделанного двигателя при $2p=4$ выше, чем до перемотки, плотность тока и линейная нагрузка могут быть повышены из-за лучших условий охлаждения.

Принимаем $\Delta=6{,}5$ *а/мм²*. Тогда $I=6{,}5\cdot 2\cdot 0{,}237=3{,}1$ *а*.

$$AS=\frac{3{,}1\cdot 137\cdot 36}{2\cdot 3{,}14\cdot 98}=250 \text{ а/см};$$

$$\Delta AS=6{,}5\cdot 250=1\,630 \text{ а}^2/\text{мм}^2\cdot\text{см};$$

$$R=\frac{wl_{\text{ср}}}{46\cdot 2a\cdot Q_{\text{гол}}}=\frac{830\cdot 0{,}3}{2\cdot 46\cdot 2\cdot 0{,}237}=5{,}7 \text{ ом};$$

$IR=3{,}1\cdot 3{,}5=11$ *в*;

$3I^2R=3\cdot 3{,}1^2\cdot 5{,}7=165$ *вт.*

Определим при $2p=4$ индукции в воздушном зазоре и ярме статора:

$$B_\delta=\frac{(127-11)\cdot 10^8}{1{,}44\cdot 71\cdot 77\cdot 430\cdot 0{,}73}=4\,700 \text{ гс};$$

$$B_j=\frac{0{,}35\cdot 77\cdot 4\,700}{9{,}7}=13\,000 \text{ гс.}$$

Так как индукция в воздушном зазоре при $2p=4$ меньше, чем у односкоростного двигателя, подсчета индукции в зубце статора производить не требуется. Определим полезную мощность двигателя при $2p=4$, считая, что произведение энергетических показателей на 20% выше, чем у исходного двигателя, так как в серийном электродвигателе АОЛ2-21/4 $\eta\cos\varphi=0{,}625$ вместо 0,52 у АОЛ2-21/6.

$P=3\cdot 127\cdot 3{,}1\cdot 0{,}62\cdot 10^{-3}=0{,}73$ *квт.*

Полученные расчетным путем значения полезной мощности двигателя при различных скоростях вращения уточняются на основании результатов испытаний. При этом возможны случаи, когда препятствием для увеличения полезной мощности является не допустимое превышение температуры обмотки статора, а механические каче-

ства двигателя, обусловленные начальным моментом, максимальным моментом и минимальным моментом в процессе пуска.

В рассмотренном примере обмотка электродвигателя при переделке была рассчитана на напряжение 220 *в*. Если бы требовалось рассчитать обмотку на другое напряжение, число последовательных витков в фазе обмотки следовало бы изменить прямо пропорционально, а поперечное сечение провода — обратно пропорционально напряжению.

Таким образом, при перемотке двигателя, например, на 380 *в* число последовательных витков в фазе $w = \frac{830 \cdot 380}{220} = 1\,440$, $s_n = \frac{138 \cdot 380}{220} = 240$ проводов в пазу, а $Q_{гол} = \frac{0{,}237 \cdot 380}{220} = 0{,}137$ *мм²*, что соответствует $d_{гол} = 0{,}41$ *мм*.

Пример 2. Переделка односкоростного электродвигателя типа АОЛ-42-6 на двухскоростной 1 000/3 000 *об/мин*, $P = \text{const}$.

Технические данные двигателя АОЛ-42-6: 1,7 *квт*; 220/380 *в*; 7,5/4,3 *а*; 930 *об/мин*; $\eta = 79{,}5\%$; $\cos\varphi = 0{,}75$; $I_{пуск}/I_{ном} = 4{,}5$; $M_{нач}/M_{ном} = 1{,}6$; $M_{макс}/M_{ном} = 1{,}9$.

Основные размеры:

$D_{нар} = 182$ *мм*;
$D_{вн} = 112$ *мм*;
$D_{рот} = 111{,}4$ *мм*;
$D_{вала} = 36$ *мм*;
$l_1 = 115$ *мм*;
$l_2 = 118$ *мм*;
$z_1 = 36$ пазов;
$z_2 = 26$ пазов;
$F_{св} = 126$ *мм²*;
$F_{из} = 98$ *мм²*;
$b_z = 4{,}6$ *мм*;
$h_j = 15{,}5$ *мм*.

Обмоточные данные: обмотка однослойная; $y = 1$—$8(7)$ и 2—$7(5)$; $s_n = 50$; провод марки ПЭЛБО, ∅ 1,0/1,185 *мм*; $2a = 1$; соединение катушек последовательное; $q = 2$; $k_{зап} = 0{,}71$; $l_{ср} = 0{,}45$ *м*;

$$R_{ф15°C} = 30 \text{ ом}; \ G_м = 3{,}2 \text{ кг}.$$

Проверочный расчет односкоростного двигателя:

1. $\Delta = \frac{4{,}3}{0{,}785} = 5{,}5$ *а/мм²*.

2. $AS = \frac{4{,}3 \cdot 50 \cdot 36}{3{,}14 \cdot 11{,}2} = 220$ *а/см*.

3. $\Delta AS = 5{,}5 \cdot 220 = 1\,210$ *а²/мм²·см*.

4. $w = \frac{50 \cdot 36}{6} = 300$ витков.

5. $R = 3{,}0 \cdot 1{,}24 = 3{,}72$ *ом*.

6. $3I^2R = 3 \cdot 4{,}3^2 \cdot 3{,}72 = 206$ *вт*.

7. $\tau = \frac{112 \cdot 3{,}14}{6} = 58{,}5$ *мм*.

8. $t = \frac{112 \cdot 3,14}{36} = 9,85$ *мм.*

9. $к = 0,96$ (находим по табл. 1 для $2p = 6$; $y = 6$ и $q = 2$).

10. $B_\delta = \frac{(220 - 4,3 \cdot 3,72)\, 10^8}{1,44 \cdot 116 \cdot 58,5 \cdot 300 \cdot 0,96} = 7\,200$ *гс.*

11. $B_z = \frac{7\,200 \cdot 9,85}{0,95 \cdot 4,6} = 16\,200$ *гс.*

12. $B_j = \frac{0,35 \cdot 58,5 \cdot 7\,200}{15,5} = 9\,500$ *гс.*

Переделаем односкоростной двигатель АОЛ-42-6 в двухскоростной 1 000/3 000 *об/мин,* на напряжение 220 *в*, для случая, когда требуется приблизительно одинаковая полезная мощность на обеих скоростях. Для подобного режима работы при соотношениях между числами полюсов 6 : 2 наиболее благоприятные результаты по техническим данным и использованию сердечника двигателя при каждой скорости дает схема обмотки Х2/6=2, △/△, с 10 выводами на переключатель полюсов, представленная на рис. 16. Схема Х2/6-2 по расположению и соединению обмотки аналогична схеме △/⅄⅄/△, подробно описанной выше, от которой отличается только уменьшенным количеством выводов, так как вместо переключения на три скорости обмотка переключается только на две скорости 1 000/3 000 *об/мин.*

Так как низшая скорость двухскоростного двигателя не отличается от скорости вращения переделываемого односкоростного двигателя, индукцию в воздушном зазоре оставляем без изменения. Применяем двухслойную обмотку с диаметральным шагом по пазам для $2p=6$. Из схемы следует, что обмотка фазы при низшей скорости состоит из четырех катушек, из которых две выполнены с $q=4$ и две с $q=2$. При $2p=2$ рядом лежащие катушки с $q=4$ и $q=2$ объединяются в одну с $q=6$.

Из табл. 1 находим обмоточные коэффициенты для $y=1-7(6)$ при $2p=6$ и $2p=8$, которые соответственно будут равны 0,92 и 0,48. При неизменной индукции в воздушном зазоре число витков в фазе будет изменяться обратно пропорционально изменению обмоточных коэффициентов.

Расчет двухскоростного двигателя

а) $2p=6$, число последовательных витков в фазе и число проводов в пазу:

$$w = \frac{300 \cdot 0,96}{0,92} = 312 \text{ витков;}$$

$$s_n = \frac{312 \cdot 2}{12} = 52 \text{ провода.}$$

Принимая коэффициент заполнения паза обмоткой $K_{зап}=0,72$, определим диаметр изолированного провода, а также диаметр и сечение голого провода.

$$d_{из} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 98}{1 \cdot 52}} = 1,16 \text{ мм.}$$

5—41

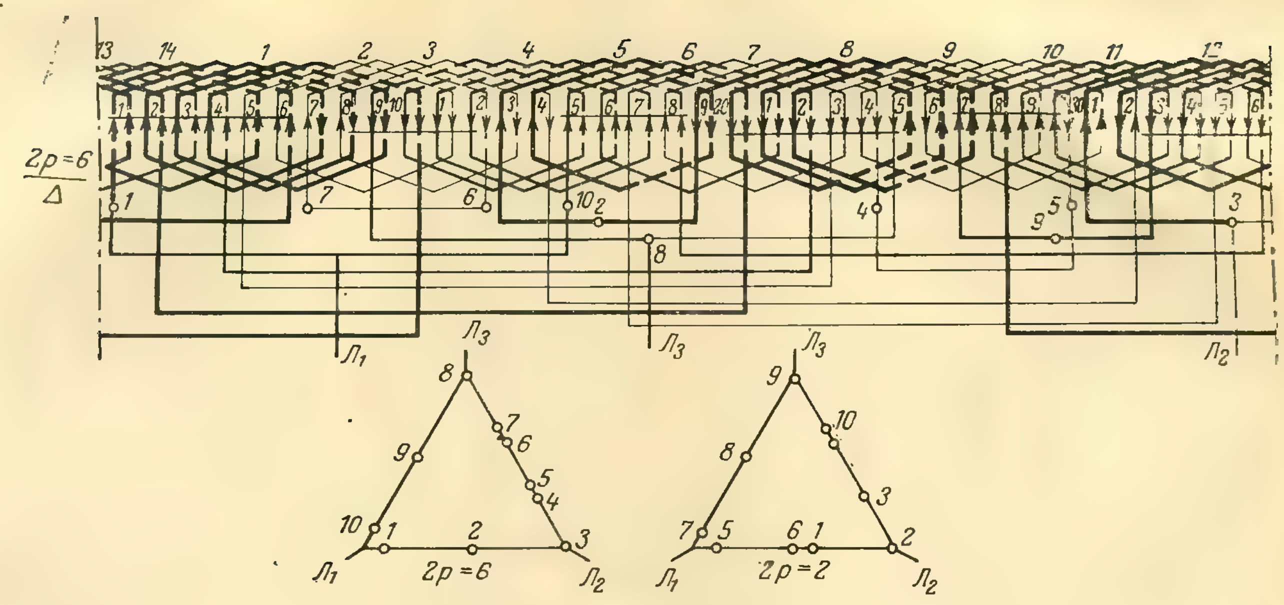


Рис. 16. Рабочая схема обмотки X2/6-2.

Берем провод марки ПЭВ-2, у которого при диаметре свыше 1,0 *мм* толщина изоляции составляет около 0,08 *мм* по диаметру $d_{гол}=1{,}08$ *мм*; $Q_{гол}=0{,}92$ *мм*². Следует обратить внимание, что в данном случае, несмотря на некоторое увеличение числа проводов в пазу у двухскоростного двигателя по сравнению с односкоростным, сечение провода не только не уменьшилось, а даже увеличилось за счет применения провода с более тонкой изоляцией. Следовательно, возможно при $2p=6$ несколько повысить полезную мощность двигателя.

Определим ток в фазе обмотки, сопротивление фазы в нагретом состоянии, удельную нагрузку, ΔAS и потери в обмотке статора:

$$I=5{,}5\cdot 0{,}92=5{,}0\ a;$$

$$R=\frac{312\cdot 0{,}45}{46\cdot 0{,}92}=3{,}3\ ом;$$

$$3I^2R=3\cdot 5{,}0^2\cdot 3{,}3=248\ вт;$$

$$AS=\frac{5\cdot 52\cdot 36}{11{,}2\cdot 3{,}14}=266\ а/см;$$

$$\Delta AS=5{,}5\cdot 266=1\,460\ а/мм^2\cdot см.$$

Полученные значения потерь в обмотке статора при $2p=6$ превышают аналогичные данные односкоростного двигателя. Для их снижения возможны два пути: уменьшение плотности тока в обмотке статора и уменьшение числа проводов в пазу.

Снизим плотность тока с 5,5 *а/мм*² до 5,2 *а/мм*². При этом фазовый ток $I=4{,}8$ *а*.

Потери в обмотке статора $3I^2R=3\cdot 4{,}8^2\cdot 3{,}3=228$ *вт*.

$$AS=\frac{4{,}8\cdot 52\cdot 36}{11{,}2\cdot 3{,}14}=255\ а/см;$$

$$\Delta AS=5{,}5\cdot 255=1\,330\ а/мм^2\cdot см.$$

После корректировки потери при $2p=6$ и потери односкоростного двигателя почти совпадают. Определим полезную мощность двигателя:

$$P=3\cdot 220\cdot 4{,}8\cdot 0{,}795\cdot 0{,}75\cdot 10^{-3}\approx 1{,}9\ квт.$$

Если бы двигатель АОЛ-42-6 требовалось перемотать не на 220 *в*, а на 500 *в*, то, согласно сказанному выше,

$$w=\frac{312\cdot 500}{220}=708\ \text{витков};$$

$$s_п=\frac{52\cdot 500}{220}=118\ \text{проводов};$$

$$Q_{гол}=\frac{0{,}92\cdot 220}{500}=0{,}405\ мм^2;$$

$$d_{гол}=0{,}72\ мм.$$

б) $2p=2$. Вследствие значительного повышения скорости вращения и в связи с этим лучшего охлаждения обмотки статора потери в ней по сравнению с исходным двигателем могут быть увеличены без опасения перегрева обмотки. Вместе с тем следует иметь в виду, что из-за повышенных значений индукции в спинке статора при высших скоростях потери в стали могут возрасти до такой сте-

пени, что вызовут повышенный нагрев двигателя. Поэтому принимаем повышение плотности тока в обмотке статора при $2p=2$ только на 15% по сравнению с $2p=6$:

$$\Delta=5{,}2\cdot1{,}15=6\ a/мм^2;$$

$$I=6{,}0\cdot0{,}92=5{,}5\ a/мм^2;$$

$$3I^2R=3\cdot5{,}5^2\cdot3{,}3=300\ вт;$$

$$AS'=\frac{5{,}5\cdot52\cdot36}{11{,}2\cdot3{,}14}=292\ a/см;$$

$$\Delta AS=6\cdot292=1\,750\ a^2/мм^2\cdot см.$$

Определяем индукцию в воздушном зазоре и спинке статора:

$$B_\delta=\frac{(220-5{,}5\cdot3{,}3)10^8}{1{,}44\cdot116\cdot175\cdot312\cdot0{,}48}=4\,600\ гс,$$

$$B_j=\frac{0{,}35\cdot175\cdot4\,600}{15{,}5}=18\,200\ гс.$$

Полученное значение B_δ близко к предельно допускаемым значениям. Поэтому, хотя желательно с точки зрения повышения перегрузочной способности двигателя и повысить B_j при $2\ p=2$, в данном случае это сделать невозможно из-за слишком большой B_δ.

У односкоростного серийного двигателя АОЛ-42-2 $\eta\cos\varphi=0{,}84\cdot0{,}88=0{,}74$. Считая, что для двухскоростного двигателя при $2p=2$ произведение энергетических показателей останется примерно таким же, находим полезиую мощность двигателя при высшей скорости:

$$P=3\cdot220\cdot5{,}5\cdot0{,}74\cdot10^{-3}=2{,}65\ квт.$$

Пример 3. Переделка односкоростного электродвигателя типа АО2-52-4 на двухскоростной 1 000/1 500 *об/мин.*

Технические данные двигателя АО2-52-4: 10 *квт*; 220/380 *в*; 33/19 *а*; 1 460 *об/мин*; $\eta=89\%$; $\cos\varphi=88$; $I_{пуск}/I_{ном}=7$; $M_{нач}/M_{ном}=1{,}4$; $M_{макс}/M_{ном}=2$.

Основные размеры:

$D_{нар}=243$ *мм*;
$D_{вн}=158$ *мм*;
$D_{рот}=157{,}1$ *мм*;
$D_{вала}=52$ *мм*;
$l_1=170$ *мм*;
$l_2=174$ *мм*;
$z_1=36$ пазов;
$z_2=26$;
F в свету $=196$ *мм*^{2};
F с изоляцией $=155$ *мм*^{2};
$b_z=6$ *мм*;
$h_j=19{,}6$ *мм*.

Обмоточные данные: класс изоляции Е; обмотка двухслойная; $y=1-8(7)$; $s_n=20$ эффективных проводов (60); провод марки ПЭТВ-ТЛ, ∅1,30/1,38 *мм*; $2a=3$; соединение катушек последовательное; $q=3$; $l_{ср}=0{,}684$ *м*; $R_{ф20\,°C}=0{,}362$ *ом*; $к_{зап}=0{,}74$; $G_М=8{,}9$ *кг*.

Проверочный расчет односкоростного двигателя:

1. $\Delta = \frac{19}{3 \cdot 1,32} = 4,8$ *а/мм²*.

2. $AS = \frac{19 \cdot 60 \cdot 36}{3 \cdot 3,14 \cdot 15,8} = 277$ *а/см*.

3. $\Delta AS = 4,8 \cdot 277 = 1\,330$ *а/мм²·см*.

4. $w = \frac{60 \cdot 12}{3 \cdot 2} = 120$ витков.

5. $R = 1,24 \cdot 0,362 = 0,45$ *ом*.

6. $3I^2R = 3 \cdot 19^2 \cdot 0,45 = 490$ *вт*.

7. $\tau = \frac{158 \cdot 3,14}{4} = 124$ *мм*.

8. $t = \frac{158 \cdot 3,14}{36} = 13,8$ *мм*.

9. $\kappa = 0,90$ (находим по табл. 1 для $2p = 4$, $y = 7$ и $q = 3$).

10. $B_\delta = \frac{220 - (19 \cdot 0,45) \cdot 10^{-3}}{1,44 \cdot 172 \cdot 124 \cdot 120 \cdot 0,9)} = 6\,550$ *гс*.

11. $B_z = \frac{6\,550 \cdot 13,8}{0,95 \cdot 6,0} = 15\,800$ *гс*.

12. $B_j = \frac{0,85 \cdot 124 \cdot 6\,550}{19,6} = 14\,500$ *гс*.

Односкоростной двигатель АО2-52-4 переделаем в двухскоростной на 1 000/1 500 *об/мин*, на напряжение 380 *в*, для режима $P = \text{const}$. Применим новейшую схему Х6/6-4, △⅄/⅄⅄, при которой переключение полюсов производится всего лишь при шести выводах на переключатель. Схема Х6/6-4, △⅄/⅄⅄, представлена на рис. 17. По сравнению со схемами для переключения полюсов в отношении 6 : 4, рассмотренными ранее, эта схема имеет минимальное количество выводов, но несколько худшее использование сердечника двигателя вследствие того, что при каждой скорости вращения обмотка используется неполностью. Обмотка состоит из двух частей — *а* и *б*. При $2p=6$ включена полностью обмотка *а*, распределенная на луче звезды смешанного соединения «звезда — треугольник» и $^2/_3$ обмотки *б*, распределенной на стороне треугольника. При $2p=4$ полностью включена обмотка *б*, соединенная в две параллельные звезды, а обмотка *а* от сети отключена.

Обмотка *а* — однослойная. Обмотка *б* — двухслойная. Каждая из обмоток выполняется с различным шагом по пазам $y_а = 1—7(6)$, $y_б = 1—8(7)$.

Рассчитаем обмотку *б* при высшей скорости вращения.

а) $2p=4$. Обмотка выполнена катушками с $q=4$ и $q=2$, с $y = 1—8(7)$.

$$\kappa = \frac{2 \cdot 0,93 + 0,99}{3} \cdot 0,94 = 0,89.$$

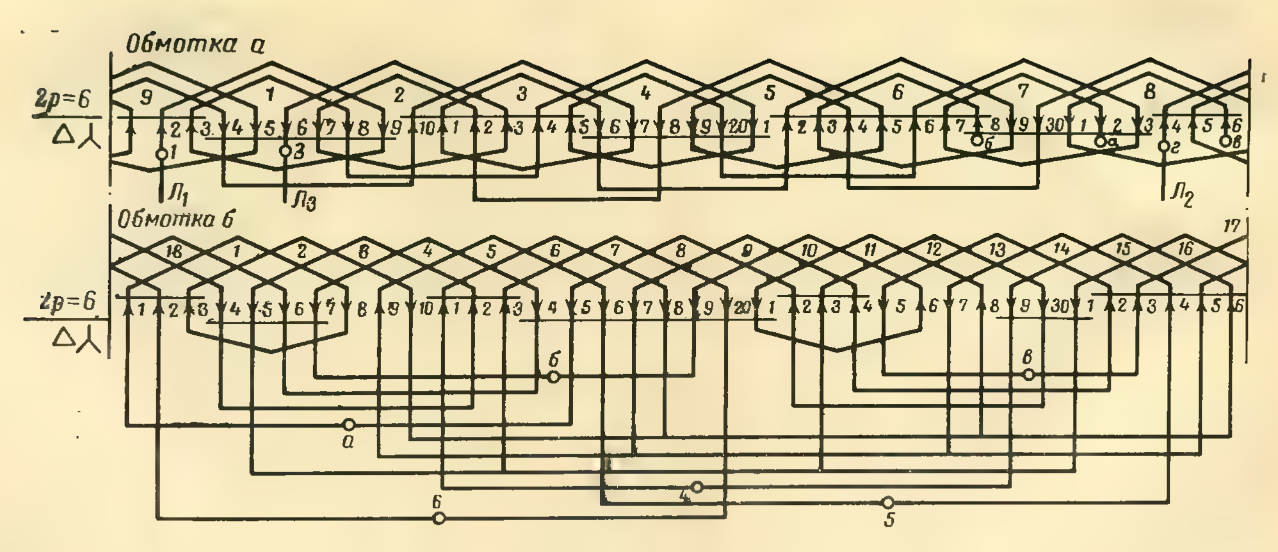


Рис. 17. Рабочая схема обмотки Х6/6-4.
Число выводов обмотки статора 6.
$2p=6\Delta$⅄; $Л_1$—1; $Л_2$—2; $Л_3$—3. Свободны: 4, 5, 6.
$2p=4$ ⅄⅄; $Л_1$—4; $Л_2$—5; 1—2—3; $Л_3$—6.

Принимаем $B_\delta = 6\,700$ *гс.*

$$w = \frac{(220 - 11)\cdot 10^8}{1,44\cdot 172\cdot 124\cdot 6\,700\cdot 0,89} = 114 \text{ витков.}$$

Так как при этой скорости обмотка соединена в ⅄⅄, число проводов в пазу

$$s_n = \frac{114}{3} = 38.$$

Берем провод марки ПЭТВ-ТЛ, как и у серийного односкоростного двигателя Принимаем $\Delta = 6,2$ *а/мм²* и $d_{гол}/d_{изол} = 1,25/1,33$ *мм*; $Q_{гол} = 1,22$ *мм.*

Находим фазный ток $I = 6,2\cdot 1,22\cdot 2 = 15,1$ *а.*

$$AS = \frac{15,1\cdot 38\cdot 36}{2\cdot 3,14\cdot 15,8} = 208 \ a/см;$$

$$\Delta AS = 6,2\cdot 208 = 1\,290 \ a/мм^2\cdot см;$$

$$R = \frac{114\cdot 0,684}{46\cdot 2\cdot 1,22} = 0,69;$$

$$3I^2R = 3\cdot 15,1^2\cdot 0,69 = 470 \ вт.$$

Полученные значения потерь меньше, чем у переделываемого односкоростного двигателя при той же скорости вращения, и опасаться повышенного нагрева обмотки нет оснований.

$$P = 3\cdot 220\cdot 15,1\cdot 0,78\cdot 10^{-3} = 7,8 \ квт.$$

б) $2p = 6$. Задаваясь $B_\delta = 6\,700$ *гс* и $IR = 14$ *в*, определим число эффективных витков в фазе при соединении обмотки в звезду:

$$w_{эфф} = \frac{(220 - 14)10^8}{1,44\cdot 172\cdot 83\cdot 6\,700} = 150.$$

Такое число $w_{эфф}$ надо получить при совместном включении обмотки *а*, соединенной в звезду, и $^2/_3$ обмотки *б*, соединенной последовательно в треугольник. Преобразуем обмотку *б* в эквивалентную звезду. При этом

$$w_\delta = \frac{114\cdot 2\cdot 2}{1,73\cdot 3} = 88 \text{ витков и } d = 1,65/1,73 \ мм.$$

Таким образом, обмотка *б*, соединенная треугольником, по своему действию по при $2p = 6$ эквивалентна обмотке, соединенной в звезду, выполненной с числом витков, меньшим в $\sqrt{3}$, но с сечением в $\sqrt{3}$ раз большим, чем обмотка *б*. Определим обмоточный коэффициент обмотки *б* с учетом того, что при $2p = 6$ остаются включенными только катушки с $q = 4$:

$$k = \frac{\sin 90^\circ\cdot\frac{4}{6}}{4\sin 15^\circ}\sin\left(90^\circ\frac{7}{9}\right) = 0,84\cdot 0,94 = 0,79.$$

Число эффективных витков от обмотки *б* составит:

$$w_{эфф}=88 \cdot 0{,}79=70 \text{ витков.}$$

Следовательно, от включения части обмотки *б* при $2p=6$ мы получаем 70 эффективных витков, и от включения обмотки *а* надо добавить $w_{эфф}=150-70=80$ эффективных витков. Обмотка *а* представляет собой обычную однослойную обмотку с $q=2$ и $y=1-7(6)$. Для такой обмотки $\kappa=0{,}96$. Определим число витков обмотки *а* и число проводов в пазу:

$$w_a=\frac{80}{0{,}96}=84;$$

$$s_{па}=\frac{84}{6}=14 \text{ проводов в пазу.}$$

Обмотку *а* выполняем проводом той же марки, что и обмотку *б*. Сечение провода должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, т. е. соответствовать сечению эквивалентной обмотки ∅ 1,65/1,73 *мм*, $Q_{гол}=2{,}12$ *мм²*.

Принимаем $\Delta=6{,}2$ *а/мм²*. Тогда $I=6{,}2 \cdot 2{,}12=13{,}1$ *а*;

$$AS=\frac{154 \cdot 13{,}1 \cdot 36}{6 \cdot 3{,}14 \cdot 15{,}8}=244 \text{ а/см}^2;$$

$$\Delta AS=6{,}2 \cdot 244=1\,510 \text{ а/мм}^2 \cdot \text{см};$$

$$R=R_a+R_б=\frac{84 \cdot 0{,}66}{46 \cdot 2{,}12}+\frac{0{,}69 \cdot 4 \cdot 2}{3 \cdot 3}=0{,}57+0{,}61=1{,}18 \text{ ом};$$

$$3I^2R=3(13{,}1^2 \cdot 0{,}57+7{,}6^2 \cdot 1{,}84)=609 \text{ вт};$$

$$P_2=3 \cdot 220 \cdot 13{,}1 \cdot 0{,}65 \cdot 10^{-3}=5{,}7 \text{ квт}.$$

Проверим коэффициенты заполнения паза каждой из обмоток и общий $\kappa_{зап}$:

$$\text{для обмотки } а \quad \kappa_{зап}=\frac{14 \cdot 1{,}73^2}{150}=0{,}28;$$

$$\text{для обмотки } б \quad \kappa_{зап}=\frac{38 \cdot 1{,}33^2}{150}=0\,445;$$

$$\kappa_{зап}=0{,}28+0{,}445=0{,}725.$$

На сердечнике односкоростного двигателя АО2-52-4 разработаны двухскоростные модификации АО2-52-6/4 для режимов $P=\text{const}$ и $M=\text{const}$, выполненные с отдельными обмотками для каждого числа полюсов. Сравним основные параметры двигателя АО2-52-4, переделанного на двухскоростной по схеме Х6/6-4, с параметрами двухобмоточного электродвигателя АО2-52-6/4 для режима $M=\text{const}$. Технические данные двухобмоточного двигателя АО-52-6/4: 4,5/6,7 *квт*; 380 *в*; 11/14 *а*; 960/1 450 *об/мин*; $\eta=83/86\%$; $\cos\varphi=0{,}75/0{,}85$; $I_{пуск}/I_{ном}=7$; $M_{нач}/M_{ном}=1{,}3$; $M_{макс}/M_{ном}=2$.

Обмоточные данные:

$2p=6$: обмотка однослойная; $y=1-7(6)$; $s_n=26$; провод марки ПЭТВ-ТЛ, ∅ 1,40/1,48 *мм*; $2a=1$; соединение катушек последовательное; $q=2$; $l_{ср}=0{,}644$ *м*; $R_{ф20°С}=1{,}14$ *ом*; $\kappa_{зап}=0{,}38$, $G_м=4{,}18$ *кг*.

$2p=4$: обмотка однослойная; $y=1-10(9)$; $s_n=19$; провод марки

ПЭТВ-ТЛ, ∅ 1,62/1,70 *мм*; $2a=1$; соединение катушек последовательное; $q=3$; $l_{ср}=0,746$ *м*; $R_{ф20°C}=0,724$ *ом*; $к_{зап}=0,36$; $G_М=$ $=4,73$ *кг*.

Проверочный расчет двухобмоточного двигателя АО2-52-6/4:

а) $2p=6$

1. $\Delta=\dfrac{11}{1,54}=7,15$ *а/мм²*.
2. $AS=11\cdot 26\cdot 0,725=208$ *а/см*.
3. $\Delta AS=7,15\cdot 208=1\,490$ *а²/мм²·см*.
4. $w=26\cdot 6=156$ витков.
5. $к=0,96$.
6. $B_\delta=\dfrac{(220-11\cdot 1,42)\cdot 10^8}{1,44\cdot 173\cdot 83\cdot 156\cdot 0,96}=6\,600$ *гс*.
7. $3I^2R=3\cdot 11^2\cdot 1,24\cdot 1,14=520$ *вт*.

б) $2p=4$

1. $\Delta=\dfrac{14}{2,05}=6,8$ *а/мм²*.
2. $AS=14\cdot 19\cdot 0,725=193$ *а/см*.
3. $\Delta AS=193\cdot 6,8=1\,320$ *а²/мм²·см*.
4. $w=19\cdot 6=114$ витков.
5. $к=0,96$.
6. $B_\delta=\dfrac{(220-14\cdot 0,9)\cdot 10^3}{10^4\cdot 3,09\cdot 114\cdot 0,96}=6\,100$ *гс*.
7. $3I^2R=3\cdot 14^2\cdot 0,724\cdot 1,24=530$ *вт*.

Сравнение основных электрических и магнитных нагрузок обоих двигателей показывает, что они примерно одинаковы. По средней полезной мощности однообмоточный двигатель превосходит двухобмоточный в 1,2 раза:

$$\frac{5,7\ квт+7,8\ квт}{4,5\ квт+6,7\ квт}=1,2.$$

Полученная по расчету мощность является минимальной и может быть повышена по результатам испытаний, так как возможно увеличение выбранных магнитных нагрузок. Кроме того, однообмоточный двигатель будет иметь более высокие энергетические показатели вследствие повышенной мощности по сравнению с двухобмоточным. Поэтому можно полагать, что средняя мощность однообмоточного двигателя будет превышать мощность двухобмоточного более чем на 20%.

6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ЕДИНОЙ СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ А2

Заводы выпускают многоскоростные двигатели на две, три и четыре скорости. Двухскоростные двигатели охватывают скорости вращения 1 500/3 000, 1 000/1 500, 750/1 500 и 500/1 000 *об/мин*, трехскоростные —

1 000/1 500/3 000, 750/1 000/1 500 *об/мин* и четырехскоростные — 500/750/1 000/1 500 *об/мин*. С одной статорной обмоткой выполняются лишь двухскоростные двигатели с соотношением скоростей вращения 1 : 2, а двухскоростные двигатели — с соотношением скоростей 2 : 3, а также трех- и четырехскоростные двигатели выполняются с двумя независимыми обмотками на статоре. Мощность многоскоростных двигателей установлена из условий благоприятных пусковых характеристик либо из условий допустимого нагрева обмотки статора. Двухскоростные двигатели серии А2 имеют 6 выводов на переключатель полюсов, трехскоростные — 9 и четырехскоростные — 12. Технические данные многоскоростных модификаций электродвигателей серии А2 приведены в каталоге 01 · 02 = 65.

Применение многоскоростных двигателей в машиностроении и станкостроении, в частности, имеет большие перспективы. Низшая скорость вращения многоскоростного двигателя, даже сравнительно малой мощности, часто начинается с 500 или 750 *об/мин*, что само по себе определяет увеличенные габариты двигателя по сравнению с односкоростными двигателями на 1 000 и 1 500 *об/мин*, обычно устанавливаемыми на станках.

У двухобмоточных многоскоростных двигателей габариты настолько возрастали, что они в ряде случаев оказывались неприемлемыми, особенно при встройке двигателей в станки. Значительного уменьшения габаритов многоскоростных двигателей при заданной мощности можно достичь выполнением их не на двух отдельных статорных обмотках, а однообмоточными, с одной статорной обмоткой, переключаемой на различные числа полюсов, что обеспечивает применение многоскоростных двигателей во многих моделях металлорежущих станков.

В Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) на базе единой серии А были спроектированы многоскоростные двигатели серии Т с одной статорной обмоткой, которые сейчас выпускаются серийно.

Серия Т охватывает два габарита — 4-й и 5-й, отличающиеся размерами наружного диаметра сердечника статора; каждый габарит выполняется с двумя длинами сердечников. Электродвигатели серии Т по габаритным и установочным размерам, за исключением коробки выводов, а также по длинам сердечников, внутреннему и

наружному диаметрам сердечников полностью соответствуют электродвигателям АО 4-го и 5-го габаритов единой серии А.

Сечение же пазов статора и ротора у многоскоростных электродвигателей серии Т примерно на 20% больше, чем у аналогичных по габаритам электродвигателей АО. Все электродвигатели серии Т подвергаются динамической балансировке с повышенной точностью (примерно в 2 раза превосходящей точность динамической балансировки аналогичных по габаритам и скорости обычных электродвигателей единой серии). Остаточный небаланс для четырехполюсных электродвигателей 4-го и 5-го габаритов не должен превосходить 7 и 12 *гс·см*, а для двухполюсных — 3 и 5 *гс·см*.

Многоскоростное исполнение электродвигателей серии Т охватывает 51 типоразмер с переключением полюсов обмотки статора в следующих соотношениях: 4:2; 6:2; 6:4; 8:2; 8:4; 8:6; 10:2; 12:2; 12:6; 16:2; 16:4; 6:4:2; 8:4:2; 8:6:4; 10:6:4; 12:8:4; 8:6:4:2; 12:6:4:2 и 12:8:6:4. Максимальный диапазон скоростей вращения двухскоростных электродвигателей, выпускаемых в настоящее время, составляет 1:8 (375/3 000 *об/мин*). Многоскоростные электродвигатели выпускаются на две, три и четыре скорости вращения. В отличие от многоскоростных электродвигателей единой серии, которые при двух скоростях вращения с соотношением, не равным 1:2, а также при трех и четырех скоростях вращения имеют две статорные обмотки, электродвигатели серии Т выполняются однообмоточными. Вследствие чего, а также за счет увеличенной площади пазов, полезная мощность электродвигателей серии Т в 1,5—2 раза превышает мощность одинаковых по габаритам и скорости вращения электродвигателей АО и АОЛ. Исключение составляют только двухскоростные электродвигатели с переключением полюсов в отношении 12:2 и 16:2, имеющие наиболее широкие диапазоны переключения скоростей вращения 1:6 и 1:8, которые выполняются с двумя отдельными статорными обмотками.

Применение электродвигателей с широким диапазоном регулирования скорости целесообразно во всех случаях, когда требуется получение без каких-либо дополнительных устройств двух фиксированных скоростей вращения, — например, для ускоренных или замедлен-

ных перемещений и точного останова различных подвижных узлов станков, грузовых подъемников, пассажирских лифтов и т. п. Многополюсная обмотка может быть успешно использована также для быстрого и интенсивного торможения электродвигателя с высшей до низшей скорости вращения (синхронной). При этом происходит

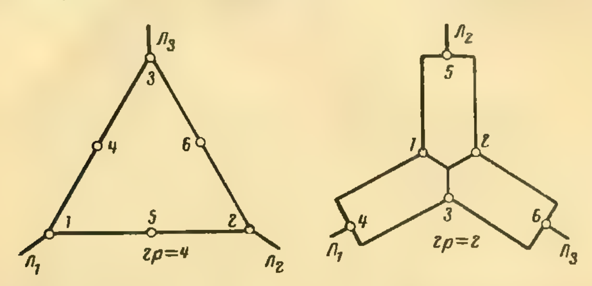


Рис. 18. Схема С2/4-2 переключения обмотки на 1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

$2p=4\Delta$; *$Л_1$—1; $Л_2$—2; $Л_3$—3*. Свободны: *4, 5, 6.*
$2p=2$ YY; *$Л_1$—4; $Л_2$—5; $Л_3$—6; 1—2—3.*

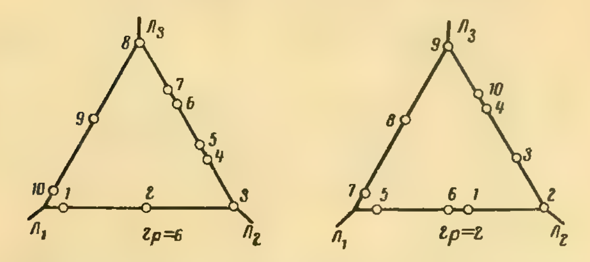


Рис. 19. Схема Х2/6-2 переключения обмотки на 1 000/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 10. Соединение выводов и подключение к сети:

$2p=6\Delta$; *$Л_1$—1—10; $Л_2$—3; 4—5, 6—7; $Л_3$—8.* Свободны: *2, 9.*
$2p=2\Delta$; *$Л_1$—5—7, 6—1; $Л_2$—2, 4—10; $Л_3$—9.* Свободны: *3, 8.*

рекуперативное торможение, сокращающее время останова механизма и не связанное с потерями энергии. Принципиальные схемы переключения обмоток для различных соотношений между числами полюсов приведены на рис. 18—38. В зависимости от соотношений между скоростями двухскоростные электродвигатели Т имеют от 6 до 14 выводов обмотки на переключатель, трехскоростные — от 9 до 18 и четырехскоростные 21—22.

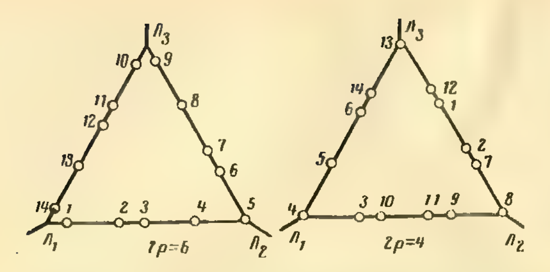


Рис. 20. Схема Х2/6-4 переключения обмотки на 1 000/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 14. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=6△; *$Л_1$—1—14, 2—3; $Л_2$—5, 6—7; $Л_3$—9—10, 11—12.* Свободны: *4, 8, 13.*

2p=4△; *$Л_1$—4, 6—14; $Л_2$—8, 9—11, 10—3; $Л_3$—13, 12—1, 2—7.* Свободны: *5.*

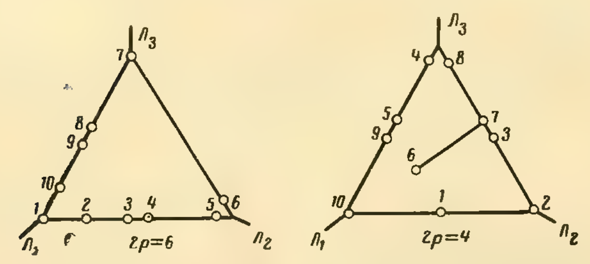


Рис. 21. Схема Х3/6-4 переключения обмотки на 1 000/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 10. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=6△; *$Л_1$—1, 3—4; $Л_2$—5—6; $Л_3$—7, 8—9.* Свободны: *2, 10.*
2p=4△; *$Л_1$—10; $Л_2$—2, 3—7; $Л_3$—8—4, 5—9.* Свободны: *1, 6.*

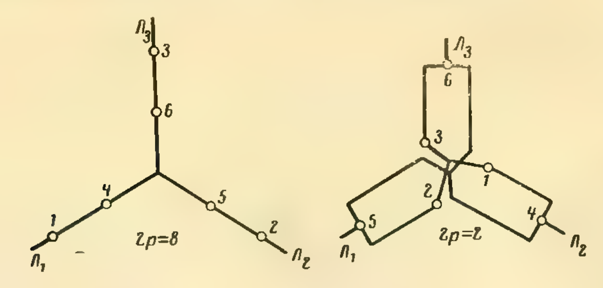


Рис. 22. Схема Х1/8-2 переключения обмотки на 750/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8 ⅄; *$Л_1$—1; $Л_2$—2; $Л_3$—3.* Свободны: *4, 5, 6.*
2p=2 ⅄⅄; *$Л_1$—5; $Л_2$—4; 1—2—3; $Л_3$—6.*

В табл. 2 приведены технические данные электродвигателей Т. При значительно большей полезной мощности и более высоких энергетических показателях по сравнению с двухобмоточными двигателями одного и того же габарита электродвигатели Т обладают высокой надеж-

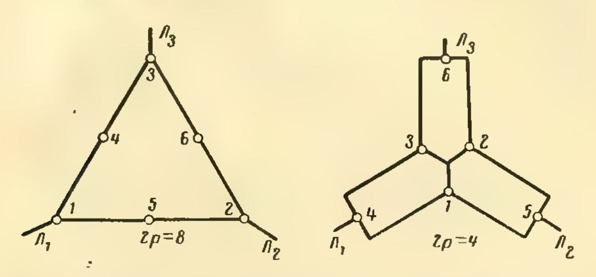


Рис. 23. Схема С2/8-4 переключения обмотки на 750/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8△; *Л*1—*1*; *Л*2—*2*; *Л*3—*3*. Свободны: *4*, *5*, *6*.
2p=4 ⅄⅄; *Л*1—*4*; *Л*2—*5*, *1*—*2*—*3*; *Л*3—*6*.

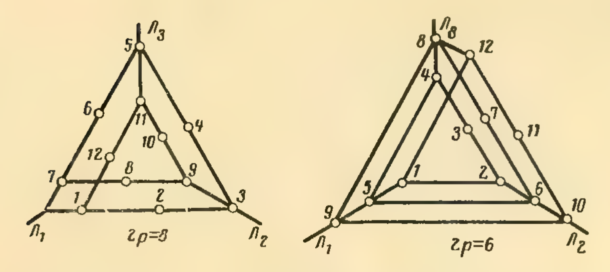


Рис. 24. Схема Х2/8-6 переключения обмотки на 750/1 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 12. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8△△; *Л*1—*1*—*7*; *Л*2—*3*—*9*; *Л*3—*5*—*11*. Свободны: *2*, *4*, *6*, *8*, *10*, *12*.

2p=6△△△; *Л*1—*1*—*5*—*9*; *Л*2—*2*—*6*—*10*; *Л*3—*4*—*8*—*12*. Свободны: *3*, *7*, *11*.

ностью в эксплуатации. Однако переключение обмотки при соотношениях полюсов, не равных 2 : 1, усложнено из-за увеличенного числа переключаемых выводов, что усложняет и удорожает аппаратуру, необходимую для переключения. За последние годы в ЭНИМС разработаны новые схемы переключения полюсов, позволяющие значительно сократить количество переключаемых выво-

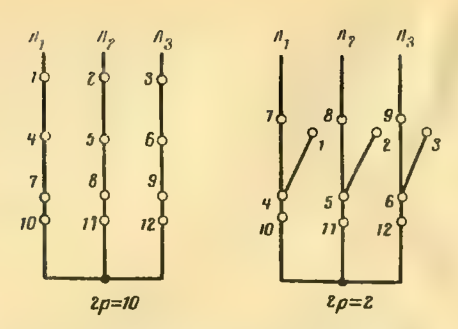
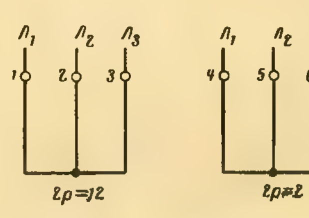


Рис. 25. Схема X1/10-2 переключения обмотки на 600/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 12. Соединение выводов и подключение к сети:

$2p=10$ ⅄; *Л*$_1$—*1*, *7—10*; *Л*$_2$—*2*, *8—11*; *Л*$_3$—*3*, *9—12*. Свободны: *4*, *5*, *6*.
$2p=2$ ⅄; *Л*$_1$—*7*, *4—10*; *Л*$_2$—*8*, *5—11*; *Л*$_3$—*9*, *6—12*. Свободны: *1*, *2*, *3*.

Рис. 26. Схема С2/12-2 переключения обмотки на 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмоток статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

$2p=12$ ⅄; *Л*$_1$—*1*; *Л*$_2$—*2*; *Л*$_3$—*3*. Свободны: *4*, *5*, *6*.
$2p=2$ ⅄; *Л*$_1$—*4*; *Л*$_2$—*5*; *Л*$_3$—*6*. Свободны: *1*, *2*, *3*.



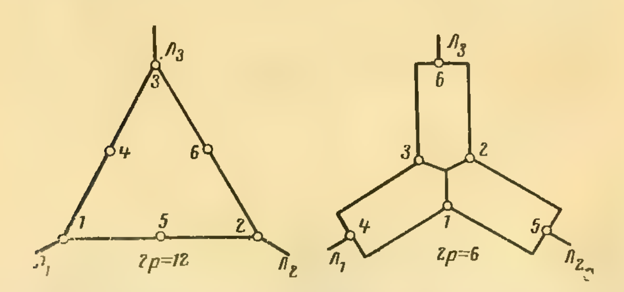


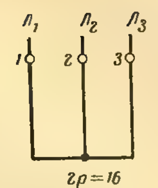
Рис. 27. Схема С2/12-6 переключения обмотки на 500/1 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

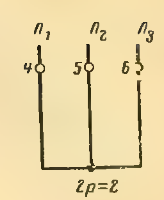
$2p=12\Delta$; *Л*$_1$—*1*; *Л*$_2$—*2*; *Л*$_3$—*3*. Свободны: *4*, *5*, *6*.
$2p=6$ ⅄⅄; *Л*$_1$—*4*; *Л*$_2$—*5*, *1—2—3*; *Л*$_3$—*6*.

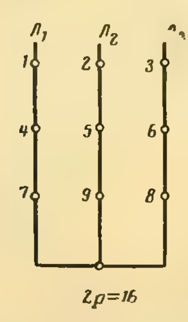
Рис. 28. Схема С2/16-2 переключения обмотки на 375/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмоток статора — 6. Соединение выводов и подключение к сети:

2р=16⅄: $Л_1$—*1*; $Л_2$—*2*; $Л_3$—*3*. Свободны: *4*, *5*, *6*.

2р=2⅄: $Л_1$—*4*; $Л_2$—*5*; $Л_3$—*6*. Свободны: *1*, *2*, *3*.







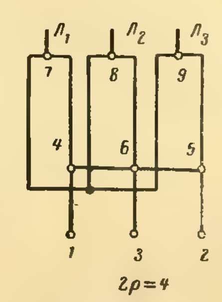


Рис. 29. Схема Х3/16-4 переключения обмотки на 375/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 9. Соединение выводов и подключение к сети:

2р=16 ⅄: $Л_1$—*1*; $Л_2$—*2*; $Л_3$—*3*. Свободны: *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9*.

2р=4 ⅄⅄: $Л_1$—*7*; $Л_2$—*8*; *4*—*5*—*6*; $Л_3$—*9*. Свободны: *1*, *2*, *3*.

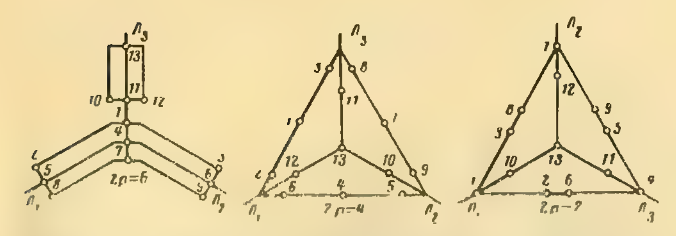


Рис. 30. Схема Х1/6-4-2 переключения обмотки на 1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 13. Соединение выводов и подключение к сети:

2р=6 ⅄⅄⅄: $Л_1$—*2*—*5*—*8*; $Л_2$—*3*—*6*—*9*; $Л_3$—*13*, *1*—*4*—*7*—*10*—*11*—*12*.

2р=4△ ⅄: $Л_1$—*2*—*6*—*12*; $Л_2$—*5*—*9*—*10*; $Л_3$—*3*—*8*—*11*. Свободны: *1*, *4*, *7*, *13*.

2р=2△ ⅄: $Л_1$—*1*—*10*; *2*—*6*; $Л_2$—*7*—*12*; *8*—*3*; $Л_3$—*4*—*11*; *5*—*9*. Свободны: *13*.

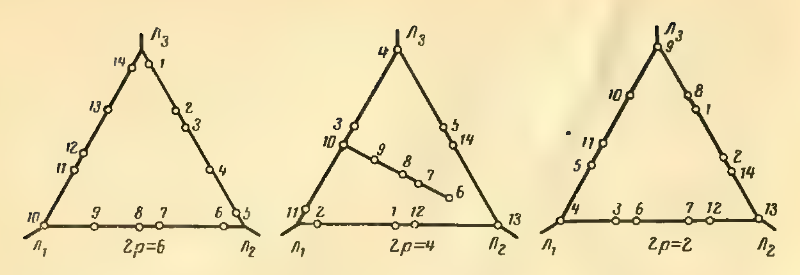


Рис. 31. Схема Х4/6-4-2 переключения обмотки на 1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 14. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=6△; $Л_1$—*10*; *11—12*, $Л_2$—*5—6*, *7—8*; $Л_3$—*1—14*; *2—3*. Свободны: *4*, *9*, *13*.
2p=4△; $Л_1$—*2—11*, *1—12*; $Л_2$—*13*, *14—15*; $Л_3$—*4*, *3—10*. Свободны: *6*, *7*, *8*, *9*.
2p=2△; $Л_1$—*4*, *3—6*, *7—12*; $Л_2$—*13*, *14—2*, *1—8*; $Л_3$—*9*, *11—5*. Свободны: *10*.

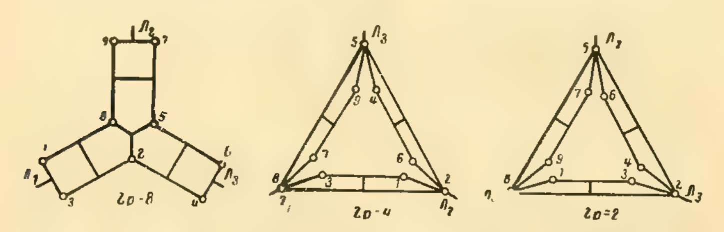


Рис. 32. Схема Х1/8-4-2 переключения обмотки на 750/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 9. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8⅄⅄; $Л_1$—*1—3*; $Л_2$—*7—9*, *2—5—8*; $Л_3$—*4—6*.
2p=4△△; $Л_1$—*3—7—8*; $Л_2$—*1—2—6*; $Л_3$—*4—5—9*.
2p=2△△; $Л_1$—*1—8—9*; $Л_2$—*5—6—7*; $Л_3$—*2—3—4*.

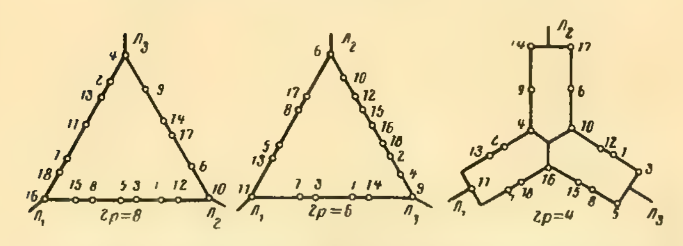


Рис. 33. Схема Х1/8-6-4 переключения обмотки на 750/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 18. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8△; $Л_1$—*16*, *18—7*, *13—2*; $Л_2$—*10*, *12—1*, *3—5*, *8—15*; $Л_3$—*4*, *14—17*. Свободны: *6*, *9*, *11*
2p=6△; $Л_1$—*11*, *13—5*, *8—17*; $Л_2$—*6*, *12—15*, *18—2*; $Л_3$—*9*, *14—1*, *3—7*. Свободны: *4*, *10*, *16*.
2p=4⅄⅄; $Л_1$—*11*, *7—18*, *13—2*; $Л_2$—*14—17*, *4—10—16*; $Л_3$—*3—5*, *1—12*, *8—15*. Свободны: *6*, *9*.

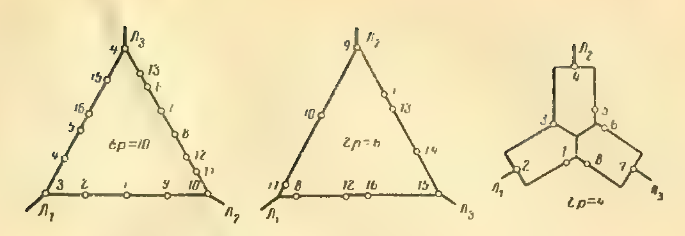


Рис. 34. Схема Х1/10-6-4 переключения обмотки на 600/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 16. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=10△; $Л_1$—3; $Л_2$—10, 11—12; 6—13, $Л_3$—14, 5—16. Свободны: 1, 2, 4, 7, 8, 9, 15.

2p=6△; $Л_1$—8—11, 12—16; $Л_2$—9; $Л_3$—15; 1—13. Свободны: остальные.

2p=4 ⅄⅄; $Л_1$—2; $Л_2$—4, 1—3—5—6—8; $Л_3$—7. Свободны: остальные.

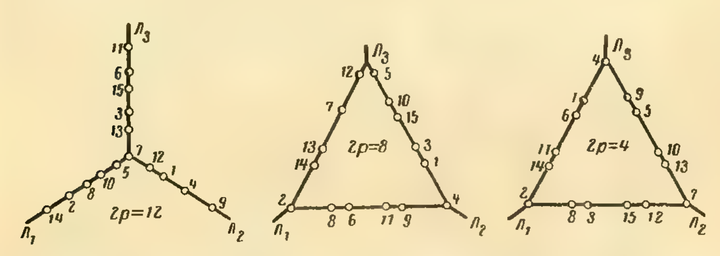


Рис. 35. Схема Х3/12-8-4 включения электродвигателей на 500/750/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 15. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=12⅄; $Л_1$—14, 8—10, 5—7; $Л_2$—9, 1—12; $Л_3$—11, 6—15, 3—13. Свободны: 2, 4.

2p=8△; $Л_1$—2, 14—13; $Л_3$—12—5; 10—15; $Л_2$—4, 9—11, 6—8. Свободны: 7.

2p=4△; $Л_1$—2, 14—11, 6—1; $Л_2$—7, 9—5, 10—13; $Л_3$—4, 12—15, 3—8.

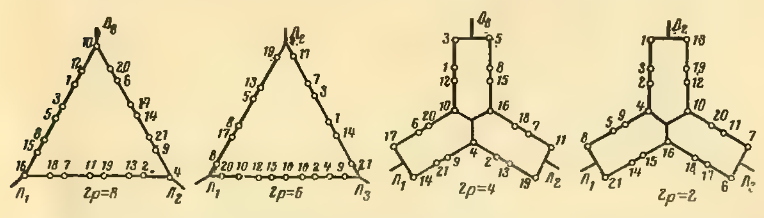


Рис. 36. Схема Х2/8-6-4-2 переключения обмотки на 750/1 000 1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 21. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=8△; $Л_1$—16, 18—7, 11—9, 13—2; $Л_2$—4, 9—21, 14—17, 6—20; $Л_3$—10, 12—1, 3—5, 8—15.

2p=6△; $Л_1$—6—20, 12—15, 18—2; $Л_2$—9—21, 14—1, 3—7; $Л_3$—11—19, 13—5, 8—17; Свободны: 4, 10, 16.

2p=4 ⅄⅄; $Л_1$—14—17, 21—9, 6—20, 4—10—16; $Л_2$—11—19; 7—18, 13—2; $Л_3$—3—5, 1—12, 8—15.

2p=2 ⅄⅄; $Л_1$—8—21, 5—9, 14—15, 4—10—16; $Л_1$—1—13, 3—2, 19—12; $Л_3$—6—7, 11—20, 17—18.

дов обмотки. Так, переключение обмотки на две скорости в отношениях 3 : 2, 4 : 3, 8 : 2, 10 : 2 осуществляются всего лишь при 6 выводах; переключения на три скорости — 8 : 4 : 2 и 8 : 6 : 4 — при 9—12 выводах и т. д. Новые схемы применены в многоскоростных электродвигателях серии Т2.

Трехфазные асинхронные многоскоростные электро-

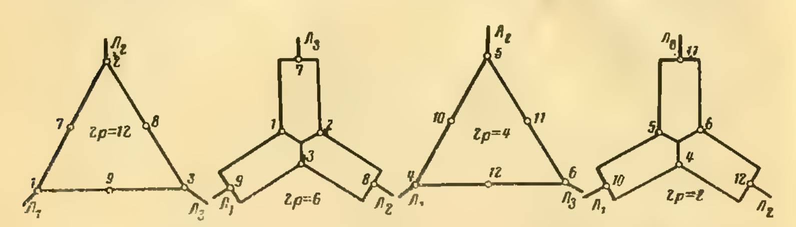


Рис. 37. Схема С4/12-6-4-2 переключения обмотки на 500/1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 12. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=12△; $Л_1$—1; $Л_2$—2; $Л_3$—3. Свободны: остальные.
2p=6 ⅄⅄; $Л_1$—9; $Л_2$—8, 1—2—3; $Л_3$—7. Свободны: остальные.
2p=4△; $Л_1$—4; $Л_2$—5; $Л_3$—6. Свободны: остальные.
2p=2 ⅄⅄; $Л_1$—10; $Л_2$—12. 4—5—6; $Л_3$—11. Свободны: остальные.

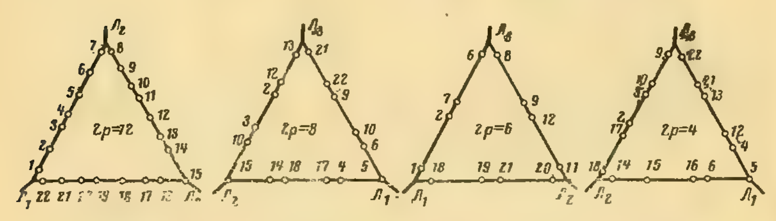


Рис. 38. Схема Х2/12-8-6-4 переключения обмотки на 500/750/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная). Число выводов обмотки статора — 22. Соединение выводов и подключение к сети:

2p=12△; $Л_1$—1—22, 3—4; $Л_2$—7—8. 10—11; 13—14; $Л_3$—15, 16—17, 19—20. Свободны: 2, 5, 6, 9, 12, 18, 21.
2p=8△; $Л_1$—5, 4—17, 18—14; $Л_3$—13—21. 22—9; 10—6; $Л_2$—15, 16—3, 2—12. Свободны: 1, 7, 8, 11, 19, 20.
2p=6△; $Л_1$—1—18, 2—7; $Л_2$—6—8, 9—12; $Л_3$—11—20, 21—19. Свободны: остальные.
2p=4△; $Л_1$—5, 6—16; $Л_2$—14—18, 17—2, 3—10; $Л_3$—9—22, 21—13, 12—4. Свободны: 1, 7, 8, 11, 15, 19, 20.

двигатели серии Т2 3-го и 5-го габаритов предназначены для замены многоскоростных электродвигателей 4-го и 5-го габаритов серии Т. Электродвигатели серии Т2 спроектированы на базе электродвигателей единой серии АО2. Все установочные размеры двигателей Т2 полностью соответствуют размерам одинаковых по габаритам двигателей АО2. По сравнению с двигателями Т

Таблица 2

Технические данные многоскоростных электродвигателей серии Т

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу, *квт*	При номинальной нагрузке: Скорость вращения, *об/мин*	При номинальной нагрузке: к. п. д., %	При номинальной нагрузке: cos φ	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Вес электродвигателя, *кг*	Маховый момент ротора, *кгс·м²*	Соединение фаз обмотки	Схема обмотки
Двускоростные двигатели 1 500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/4-2	1,7	1 400	76	0,81	4,5	1,6	2,0	26	0,048	Δ	С2/4-2
	2,2	2 800	74	0,82	4,0	1,6	2,0			YY	
Т-42/4-2	2,6	1 420	78	0,81	5,0	1,8	2,2	33	0,067	Δ	С2/4-2
	3,0	2 800	75	0,85	5,0	1,8	2,2			YY	
Т-51/4-2	4,5	1 420	80	0,83	5,0	1,5	2,0	55	0,20	Δ	С2/4-2
	5,0	2 820	72	0,85	5,0	1,9	2,0			YY	
Т-52/4-2	6,5	1 420	84	0,86	5,0	1,4	2,0	70	0,28	Δ	С2/4-2
	7,5	2 820	76	0,87	5,0	1,8	2,0			YY	
1 000/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/6-2	1,3	920	72	0,71	3,0	1,4	1,8	26	0,048	Δ	Х2/6-2
	1,7	2 800	70	0,85	3,5	1,6	1,8			Δ	
Т-42/6-2	1,7	950	75	0,66	4,0	1,8	2,0	33	0,067	Δ	Х2/6-2
	2,3	2 800	70	0,82	4,5	1,8	2,0			Δ	
Т-51/6-2	3,3	940	77	0,78	4,0	1,3	2,3	55	0,20	Δ	Х2/6-2
	3,8	2 800	72	0,88	4,5	1,6	2,4			Δ	
Т-52/6-2	4,5	940	81	0,79	4,5	1,5	2,1	70	0,28	Δ	Х2/6-2
	5,5	2 800	78	0,93	5,5	2,0	2,3			Δ	
1 000/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/6-4	1,3	920	72	0,73	3,0	1,4	1,8	26	0,048	Δ	Х2/6-4
	1,4	1 400	73	0,81	3,5	1,2	1,6			Δ	
Т-42/6-4	1,9	950	75	0,70	3,0	1,6	2,0	33	0,067	Δ	Х2/6-4
	2,1	1 420	74	0,84	3,0	1,1	1,6			Δ	
Т-51/6-4	3,5	910	83	0,75	4,0	1,2	2,0	55	0,20	Δ	Х2/6-4
	3,5	1 420	80	0,84	4,0	1,0	2,0			Δ	
Т-52/6-4	4,5	940	82	0,74	4,0	1,2	2,0	70	0,28	Δ	Х2/6-4
	5,0	1 420	80	0,85	4,0	1,0	2,0			Δ	
750/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/8-2	0,5	700	61	0,57	3,0	1,0	1,7	26	0,048	Y	Х1/8-2
	1,5	2 700	65	0,86	4,0	2,0	2,2			YY	
Т-42/8-2	0,8	700	60	0,62	3,0	1,1	1,7	33	0,067	Y	Х1/8-2
	2,3	2 800	72	0,92	4,0	2,0	2,2			YY	
Т-51/8-2	1,5	700	67	0,62	3,5	1,0	1,7	55	0,20	Y	Х1/8-2
	4,0	2 800	73	0,90	5,0	2,0	2,2			YY	
Т-52/8-2	2,7	700	75	0,62	3,5	1,0	1,7	70	0,28	Y	Х1/8-2
	6,0	2 800	79	0,94	5,0	2,0	2,2			YY	
750/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/8-4	0,65	700	64	0,64	3,0	1,3	1,8	26	0,048	Δ	С2/8-4
	1,0	1 350	72	0,85	4,0	1,3	1,8			YY	
Т-42/8-4	0,8	700	64	0,60	3,0	1,5	2,0	33	0,067	Δ	С2/8-4
	1,5	1 350	72	0,85	4,0	1,3	2,0			YY	
Т-51/8-4	2,0	700	75	0,70	3,5	1,2	1,8	55	0,20	Δ	С2/8-4
	3,0	1 400	79	0,92	3,5	1,2	1,8			YY	
Т-52/8-4	3,0	700	77	0,68	3,5	1,4	1,8	70	0,28	Δ	С2/8-4
	4,5	1 400	78	0,92	4,0	1,5	1,8			YY	

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу, *квт*	При номинальной нагрузке: скорость вращения, *об/мин*	При номинальной нагрузке: к. п. д., %	При номинальной нагрузке: cos φ	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Вес электродвигателя, *кг*	Маховый момент ротора, *кгс·м²*	Соединение фаз обмотки	Схема обмотки
750/1 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-42/8-6	0,8	700	60	0,60	3,0	1,1	1,6	33	0,067	ΔΔ	Х2/8-6
	1,5	950	70	0,61	4,5	1,8	2,0			ΔΔΔ	
600/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-52/10-2	1,6	560	68	0,57	3,0	1,1	1,9	70	0,28	⅄	Х1/10-2
	4,5	2 840	66	0,90	5,5	2,0	2,2			⅄⅄	
500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-51/12-2	1,0	450	68	0,59	2,5	0,9	1,6	55	0,20	⅄	С2/12-2
	3,0	2 800	72	0,92	4,5	1,3	1,9			⅄	
Т-52/12-2	1,4	460	68	0,59	2,5	1,0	1,6	70	0.28	⅄	С2/12-2
	4,5	2 830	74	0,92	5,5	1,5	2,2			⅄	
500/1 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-51/12-6	1,0	450	68	0,59	2,5	0,8	1.5	55	0,20	Δ	С2/12-6
	2,0	930	75	0,82	3,0	0,9	1,6			⅄⅄	
Т-52/12-6	1,6	460	68	0,59	2,5	0,8	1.7	70	0,28	Δ	С2/12-6
	3,2	940	78	0,84	3,5	0,9	1,7			⅄⅄	
375/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-51/16-2	0,5	345	51	0,40	2,0	0,9	1,6	55	0,20	⅄	С2/16-2
	3,0	2 800	72	0,92	4,5	1,3	1,9			⅄	
Т-52/16-2	0,75	345	53	0,42	2,0	0,9	1,6	70	0,28	⅄	С2/16-2
	4,5	2 830	74	0,92	5,5	1,5	2,2			⅄	
375/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-51/16-4	0,55	340	55	0,40	2,0	0,8	1,6	55	0,20	⅄	Х4/16-4
	3,5	1 460	82	0,80	5,0	1,8	3,0			⅄⅄	
Т-52/16-4	0,85	340	57	0,45	2,0	0,9	1,5	70	0,28	⅄	Х4/16-4
	5,0	1 460	82	0,77	5,0	1,8	3,0			⅄⅄	
Трехскоростные двигатели 1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/6-4-2	1,0	910	78	0,67	3,8	1,5	2,1	26	0,048	⅄⅄⅄	Х1/6-4-2
	1,2	1 380	74	0,83	3,2	1,1	1,1			Δ⅄	
	1,3	2 820	64	0,86	3,8	1,2	2,0			Δ⅄	
Т-42/6-4-2	1,3	950	73	0,70	3,5	1,4	2,0	33	0,067	⅄⅄⅄	Х1 6-4-2
	1,6	1 400	72	0,85	3,5	1,4	1,8			Δ⅄	
	1,8	2 850	68	0,89	3,5	1,4	2,0			Δ⅄	
Т-51,6-4-2	2,8	920	76	0,80	4,0	1,1	2,0	55	0,20	⅄⅄⅄	Х1/6-4-2
	3,1	1 420	76	0,92	4,0	1,1	2,0			Δ⅄	
	3,3	2 840	72	0,92	4,5	1,5	2,2			Δ⅄	
Т-52/6-4-2	4,5	950	76	0,78	4,0	1,4	1,8	70	0,28	⅄⅄⅄	Х1/6-4-2
	5,0	1 420	78	0,89	4,0	1,4	1,8			Δ⅄	
	5,3	2 800	75	0,88	5,0	2,0	2,0			Δ⅄	
750/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/8-4-2	0,5	700	60	0,57	3,0	1,0	1,7	26	0,048	⅄⅄	Х1/8-4-2
	1,4	1 370	78	0,83	4,0	1,6	1,7			⅄Δ	
	1,5	2 700	78	0,90	4,5	1,6	1,7			ΔΔ	
Т-42/8-4-2	0,8	700	60	0,62	2,5	1,0	1,6	33	0,067	⅄⅄	Х1/8-4-2
	1,8	1 400	78	0,86	5,0	1,6	2,2			ΔΔ	
	2,0	2 800	70	0,92	4,5	1,6	2,2			ΔΔ	

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу, *квт*	При номинальной нагрузке: Скорость вращения, *об/мин*	к. п. д., %	cos φ	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Вес электродвигателя, *кг*	Маховый момент ротора, *кгс·м²*	Соединение фаз обмотки	Схема обмотки
Т-51/8-4-2	1,5	700	67	0,62	3,5	1,0	1,7	55	0,20	YY	X1/8-4-2
	3,5	1 420	76	0,88	5,0	1,6	2,0			ΔΔ	
	4,0	2 800	73	0,90	5,0	2,0	2,0			ΔΔ	
Т-52/8-4-2	2,7	700	75	0,62	3,5	1,0	1,7	70	0,28	YY	X1/8-4-2
	5,5	1 420	84	0,89	5,5	2,0	2,1			ΔΔ	
	6,0	2 800	79	0,94	5,0	2,2	2,2			ΔΔ	
750/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/8-6-4	0,6	700	60	0,57	3,0	1,5	1,8	26	0,048	Δ	X1/8-6-4
	0,7	900	75	0,74	3,0	1,0	1,6			Δ	
	1,1	1 350	75	0,83	3,0	1,2	1,6			YY	
Т-42/8-6-4	0,8	700	60	0,60	2,5	1,1	1,6	33	0,067	Δ	X1/8-6-4
	1,0	900	70	0,80	2,5	1,0	1,6			Δ	
	1,4	1 350	70	0,88	4,0	1,4	1,8			YY	
Т-51/8-6-4	1,7	700	70	0,62	3,5	1,2	1,8	55	0,20	Δ	X1/8-6-4
	1,9	920	73	0,82	3,0	1,2	1,8			Δ	
	2,5	1 420	76	0,90	4,0	1,6	1,8			YY	
Т-52/8-6-4	2,7	700	76	0,62	3,5	1,3	1,7	70	0,28	Δ	X1/8-6-4
	3,2	920	73	0,82	3,0	1,2	1,6			Δ	
	4,0	1 420	78	0,90	4,0	1,6	1,8			YY	
600/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-52/10-6-4	1,6	560	68	0,57	2,5	1,0	1,5	70	0,28	Δ	X1/10-6-4
	3,0	960	74	0,70	4,0	1,5	2,3			Δ	
	4,5	1 440	78	0,83	6,0	2,2	2,5			YY	
500/750/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-52/12-8-4	1,2	450	54	0,52	2,0	1,0	1,5	70	0,28	Y	X3/12-8-4
	3,0	690	74	0,65	4,0	1,5	1,6			Δ	
	4,5	1 400	76	0,87	4,0	1,3	1,7			Δ	
Четырехскоростные двигатели 750/1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-41/8-6-4-2	0,6	700	60	0,57	3,0	1,5	1,8	26	0,048	Δ	X2/8-6-4-2
	0,7	900	75	0,74	3,0	1,0	1,6			Δ	
	1,1	1 350	75	0,83	3,0	1,2	2,0			YY	
	1,3	2 800	70	0,85	3,5	1,2	1,6			YY	
Т-42/8-6-4-2	0,8	700	60	0,60	2,5	1,1	1,6	33	0,067	Δ	X2/8-6-4-2
	1,0	900	70	0,80	2,5	1,0	1,6			Δ	
	1,4	1 350	70	0,88	4,0	1,4	1,8			YY	
	1,5	2 800	63	0,95	4,0	1,1	2,0			YY	
Т-51/8-6-4-2	1,7	700	70	0,62	3,5	1,2	1,8	55	0,20	Δ	X2/8-6-4-2
	1,9	920	73	0,82	3,0	1,2	1,8			Δ	
	2,5	1 420	76	0,90	4,0	1,6	1,8			YY	
	3,0	2 800	70	0,90	4,5	1,5	2,2			YY	
Т-52/8-6-4-2	2,7	700	75	0,62	3,5	1,3	1,7	70	0,28	Δ	X2/8-6-4-2
	3,2	900	73	0,82	3,5	1,3	1,6			Δ	
	4,0	1 420	78	0,90	4,0	1,6	1,8			YY	
	4,5	2 800	75	0,91	5,5	1,4	2,0			YY	
500/750/1 000/1 500 *об/мин* (синхронная)											
Т-51/12-8-6-4	0,8	460	61	0,55	2,5	0,7	1,5	55	0,20	Δ	X2/12-8-6-4
	1,7	700	75	0,69	4,0	1,0	2,0			Δ	
	2,0	920	77	0,70	5,0	1,1	2,5			Δ	
	2,5	1 420	76	0,91	4,5	1,1	2,0			Δ	
Т-52/12-8-6-4	1,2	460	61	0,55	2,5	0,8	1,6	70	0,28	Δ	X2/12-8-6-4
	2,5	700	72	0,64	4,0	1,3	2,2			Δ	
	3,0	920	76	0,71	5,0	1,3	2,7			Δ	
	4,0	1 420	77	0,88	5,0	1,3	2,1			Δ	

Тип электродвигателя	Номинальная мощность на валу, *квт*	При номинальной нагрузке			$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Вес электродвигателя, *кг*	Маховой момент ротора, *кгс·м²*	Соединение фаз обмотки	Схема обмотки
		Скорость вращения, *об/мин*	к. п. д. %	cos φ							
500/1 000/1 500/3 000 *об/мин* (синхронная)											
Т-52/12-6-4-2	1,2	450	61	0,55	2,0	1,0	1,5	70	0,28	Δ	С4/12-6-4-2
	2,4	920	72	0,80	3,0	1,1	1,5			λλ	
	3,2	1 440	75	0,85	4,5	1,1	1,8			Δ	
	3,5	2 840	61	0,90	5,0	1,0	1,9			λλ	

многоскоростные двигатели Т2 имеют следующие преимущества:

1) более простые схемы переключения обмотки;

2) повышенные энергетические показатели (к. п. д. и cos φ);

3) большая долговечность и надежность в эксплуатации;

4) большая мощность при одинаковых габаритах.

Электродвигатели серии Т2 предназначены для привода станков и различных механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению и другим показателям, а также к механической прочности конструкции электродвигателей. Серия Т2 охватывает два габарита — 3-й и 5-й, отличающиеся размерами наружного диаметра сердечника статора; каждый габарит выполняется с двумя длинами сердечников. По способу защиты электродвигатели выполняются закрытыми обдуваемыми. По своей конструкции (алюминиевое исполнение, наружная вентиляция и т. п.) электродвигатели Т2 не отличаются от Т. Все исполнения электродвигателей по способу монтажа, а также соотношения между скоростями вращения для многоскоростных двигателей, имевшиеся в серии Т, в серии Т2 сохраняются.

7. АППАРАТУРА ДЛЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЮСОВ ОБМОТКИ МНОГОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Управление многоскоростными электродвигателями осуществляется либо аппаратами ручного управления, либо аппаратами контакторного управления, а также комбинированно — аппаратами ручного и контакторного управления. Помимо большей прочности и надежности в работе самой контакторной аппаратуры по сравнению с аппаратурой ручного управления, контакторное управление обеспечивает большую частоту включений и выключений (иногда до нескольких сот в час) без затраты физических усилий при удобном и простом манипулировании аппаратурой.

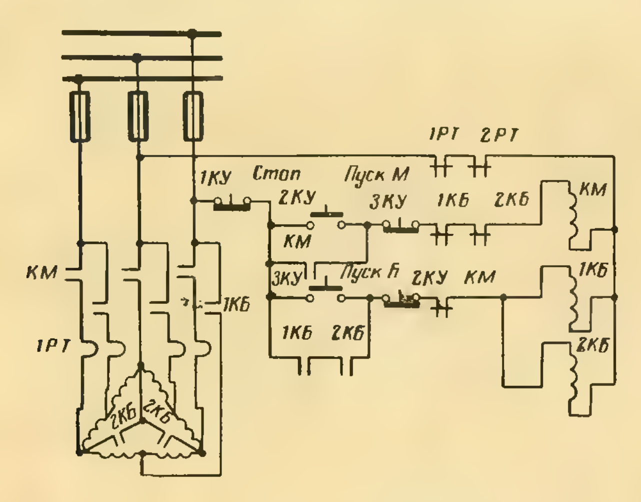


Рис. 39. Схема управления двухскоростным двигателем.

Контакторы обеспечивают до 3—5 млн. включений, в то время как число включений барабанного переключателя из-за механического износа контактов не превышает обычно 200 000.

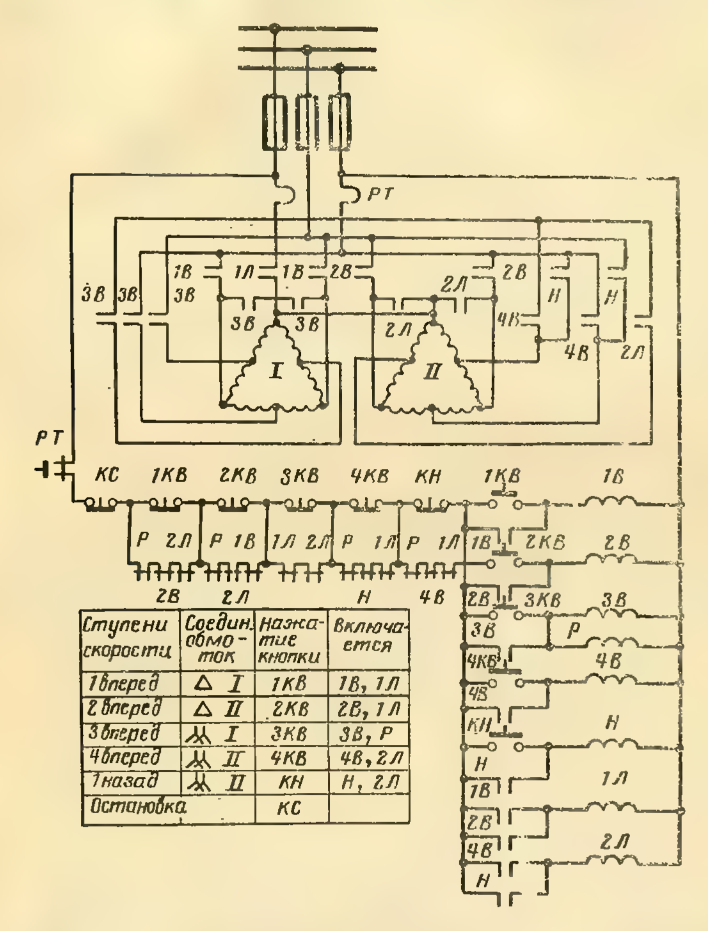
На рис. 39 приведена принципиальная схема контакторного управления двухскоростным двигателем с переключением полюсов в отношении 2 : 1 для схемы обмотки △/⅄⅄. При нажатии на кнопку *2КУ* двигатель включается на низшую скорость контактором *КМ*, а размы-

кающие блок-контакт *КМ* и контакт *2КУ* разрывают цепь катушек контакторов *1КБ* и *2КБ*. При нажатии на кнопку *3КУ* цепь катушки контактора *КМ* размыкается, а включается цепь контакторов *1КБ* и *2КБ*. Контакторы *1КБ* и *2КБ* включают двигатель на большую скорость через размыкающие блок-контакты *2КУ* и *КМ*. При нажатии на кнопку *1КУ* происходит остановка двигателя. Следует отметить, что схема контакторного управления, приведенная на рис. 39, может быть без каких-либо изменений применена для управления двухскоростными двигателями с любым соотношением скоростей, если только для включения двигателя на одной скорости требуется подвод тока к трем выводам от обмотки, а на другой — к трем другим, при одновременном замыкании первых трех выводов между собой.

На рис. 40 представлена схема управления четырехскоростным асинхронным двигателем с двумя обмотками, с переключением скоростей вращения 500/750/1 000/1 500 *об/мин*, по схеме △/△/⅄⅄/⅄⅄. Каждая обмотка выполнена с переключением полюсов в отношении 2 : 1. При нажатии на соответствующие кнопки схема позволяет получить четыре различные скорости в направлении «вперед» и одну, наивысшую скорость, «назад». Схема построена так, что при нажатии любой кнопки сразу же устанавливается соответствующая скорость без предварительного нажатия кнопки «Стоп» (*КС*), независимо от того, на какой скорости до этого работал двигатель. Происходит это вследствие того, что все кнопки «Пуск» имеют кроме замыкающих еще размыкающие контакты, которые включены параллельно размыкающим контактам тех аппаратов, которые должны сработать при других скоростях вращения (по отношению к данной кнопке).

Например, параллельно размыкающим контактам кнопки *2КВ*, соответствующей второй рабочей скорости, включены последовательно между собой размыкающие контакты аппаратов *1В*, *Р* и *2Л*, т. е. тех аппаратов, которые должны включаться на первой скорости (реле *1в*), на третьей скорости (реле *Р*), на четвертой скорости (реле *2Л*) и на скорости обратного хода (*2Л*). Следовательно, независимо от того, на какой скорости предварительно работал двигатель (за исключением второй скорости), цепь, шунтирующая кнопку *2КВ*, должна быть разомкнута. Поэтому нажатие кнопки *2КВ* должно ра-

зорвать любую цепь управления, существовавшую до момента перехода на вторую скорость, а затем замкнуть цепь, соответствующую второй скорости. Приведенная на рис. 40 таблица показывает порядок включения аппа-



Ступени скорости	Соедин. обмоток	Нажатие кнопки	Включается
1 вперед	△ I	1КВ	1В, 1Л
2 вперед	△ II	2КВ	2В, 1Л
3 вперед	⅄⅄ I	3КВ	3В, Р
4 вперед	⅄⅄ II	4КВ	4В, 2Л
1 назад	⅄⅄ II	КН	Н, 2Л
Остановка		КС	

Рис. 40. Схема управления четырехскоростным двигателем.

ратов для получения тех или иных скоростей. Катушки *1В*, *2В*, *3В*, *4В*, *Н* и *Р* при нажатии соответствующих кнопок включаются непосредственно. Катушки *1Л* и *2Л* включаются замыканием контактов других аппаратов.

Аппаратура ручного управления (переключатели, выключатели и т. п.) применяется для непосредственного

управления многоскоростными двигателями сравнительно небольшой мощности (примерно до 3—5 *квт*) при нечастых пусках. Применение аппаратов ручного управления ограничивается допускаемой мощностью отключения их контактов. Например: барабанные переключатели типа БП рассчитаны на разрыв тока не свыше 10 *а*, в то время как в замкнутом состоянии контакты выдерживают длительный ток до 30 *а*. Следовательно, если переключить обмотку при отключенном от сети двигателе, переключатель может быть использован для значительно больших по мощности двигателей, чем при переключении обмотки под током. Система управления многоскоростными двигателями, при которой переключение полюсов происходит при отключенном от сети двигателе, называется полумагнитной.

Автоматическое отключение двигателя от сети в момент переключения полюсов обмотки в полумагнитных схемах достигается следующим образом. В обычную схему пускателя последовательно с кнопкой «Стоп» включается размыкающий блок-контакт переключателя полюсов. При каждом переключении переключателя полюсов блок-контакт размыкается и отключает двигатель, благодаря чему перевод переключателя полюсов в новое положение происходит без разрыва тока. При установке переключателя в любом положении, за исключением нулевого, блок-контакт вновь замыкается, но до нажатия кнопки «Пуск» контактор пускателя не включается.

Аппаратуру, применяемую для переключения обмотки многоскоростных двигателей на различные числа полюсов, различают также по следующим признакам:

а) по номинальной мощности двигателей, обмотки которых переключаются;

б) по способу переключения (простого или моментного действия);

в) по наличию защиты (с защитой или без защиты);

г) по роду монтажа (исполнение нормальное или для встройки);

д) по количеству переключаемых скоростей (на две, три или четыре скорости).

Автоматическое переключение скоростей вращения многоскоростного двигателя возможно осуществить с помощью магнитных пускателей серий ПМЕ и ПА, контакторов, многоконтактных электромагнитных реле переменного тока и т. д.

Пускатели ПМЕ применяются для управления двигателями от 1,1 до 10 *квт*. Кроме трех главных контактов они имеют от двух до пяти блок-контактов. В зависимости от габарита пускателя блок-контакты рассчитаны на включение тока 30—60 *а* и отключение тока 8—12 *а*. Управление двигателями большей мощности (от 10 до 75 *квт*) производится пускателями *ПА*.

Для переключения полюсов обмотки многоскоростных двигателей малой мощности можно применить реле РПМ. Катушки этого реле изготовляются на напряжения от 12 до 500 *в* и рассчитаны на продолжительный режим работы. При повторно-кратковременном режиме работы с ПВ=60% реле допускает до 600 включений в час. Максимальное число контактов у реле РПМ 8 (4 замыкающих+4 размыкающих контакта), минимальное — 4; номинальный длительный ток 10 *а*, номинальное напряжение 380 *в*. В дальнейшем предполагается реле РПМ заменить промежуточным реле переменного тока серии РПТ-20 с максимальным числом контактов 12. Реле РПТ-20 будет обладать повышенной по сравнению с РПМ долговечностью и надежностью в работе и допускать при ПВ=60% до 1 200 включений в час. В ряде случаев автоматическое переключение полюсов обмотки двигателя целесообразно осуществлять командоаппаратами, сконструированными как отдельный узел, увязанный с общей компоновкой станка. Например, в револьверных станках командоаппарат, осуществляющий переключение полюсов трехскоростного двигателя 750/1 500/3 000 *об/мин*, связан с револьверной головкой станка таким образом, что при повороте головки в зависимости от требуемого процесса обработки (точение, сверление, нарезание резьбы и т. д.) одновременно осуществляется переключение командоаппаратом обмотки двигателя на соответствующую скорость вращения.

Из аппаратов ручного управления многоскоростными двигателями значительное распространение получили переключатели полюсов различных типов, и среди них барабанные *переключатели БП и БПК*. Переключатели эти набираются из стандартных пластмассовых элементов и рассчитаны на переключение обмотки на две, три и четыре скорости вращения для многоскоростных однообмоточных и двухобмоточных двигателей. В зависимости от схемы переключения полюсов двигателя переключатели БП и БПК имеют различные размеры по длине.

Переключатели БП рассчитаны на напряжение сети до 500 *в* и максимальный длительный ток 10 *а*. В зависимости от напряжения сети переключатели типа БП допускают переключение полюсов двигателей со следующей мощностью:

Номинальное напряжение, *в*	127	220	380	500
Мощность двигателя, *квт*	1,5	2,2	3,0	3,5

Переключатели БП1 применяются для переключения двухскоростных обмоток по схемам △/⅄⅄, ⅄⅄/△ и ⅄/⅄⅄ с шестью выводами. Переключение скоростей по этим схемам возможно не только в отношении 1 : 2 (500/1 000, 750/1 500, 1 500/3 000 *об/мин*), но и в отношении 1 : 4, например, 750/3 000 *об/мин.* Переключателями БП2, БП3 и БП4 осуществляется переключение полюсов обмотки двухскоростных двигателей с соотношением скоростей, не равным 1 : 2, а также трех- и четырехскоростных двигателей.

Барабанные переключатели серии БПК применяются для переключения полюсов многоскоростных электродвигателей большей мощности.

Переключатели БПК предназначены для переключений при обесточенных главных контактах переключателя и рассчитаны на работу совместно с контактором по полумагнитной схеме. В переключателе вмонтирован блок-контакт, включаемый в цепь катушки контактора. В рукоятке переключателя имеется кнопка, при нажиме на которую возможен поворот рукоятки в другое положение. При повороте рукоятки происходит выключение блок-контакта и отключение контактора от сети. Блок-контакт отключается раньше, чем происходит переключение главных контактов, а замыкается после замыкания главных контактов, поэтому переключение переключателя БПК происходит при обесточенных контактах.

При переключениях с использованием БПК возможны две схемы управления контактором:

а) Нажатие на кнопку рукоятки БПК отключает контактор от сети, и для пуска электродвигателя следует снова нажать кнопку «Пуск».

В этом случае кнопка на рукоятке переключателя БПК может выполнять функции кнопки «Стоп».

б) Нажатие на кнопку рукоятки БПК отключает контактор только на время переключения рукоятки в новое положение. При освобождении кнопки контактор авто-

матически включается. В этом случае требуется дополнительно установка промежуточного реле, блокирующего кнопку «Пуск».

Переключатель БПК рассчитан на номинальный длительный ток 50 *а* при напряжении до 500 *в*. Максимальная мощность многоскоростных электродвигателей, управляемых переключателем БПК, составляет при напряжении 220 *в* 14 *квт*, при 380 *в* — 20 *квт* и 500 *в* — 28 *квт*. Длительный ток блок-контакта 4,0 *а*. Блок-контакт допускает кратковременные толчки тока до 20 *а*. Ток размыкания блок-контакта равен при 127 *в* — 4 *а*, при 220 *в* — 3,0 *а*, при 380 *в* — 1,0 *а*, при 500 *в* — 0,5 *а*. Момент, необходимый для переключения рукоятки, не превышает 0,13 *кгс·м* на каждую секцию переключателя. Срок службы переключателей БПК — не менее 200 000 переключений.

Схемы переключателей типов БП и БПК разработаны для всех однообмоточных многоскоростных двигателей. Цифры в наименовании переключателя соответствуют схеме обмотки многоскоростного двигателя, для которой предназначен переключатель.

Пакетно-кулачковые переключатели и выключатели серий ПКП и ПКВ являются поворотными аппаратами с ручным приводом. Они состоят из квадратного вала, на который собираются пластмассовые пакеты, коммутирующие устройства, механизм фиксации, панель для крепления и рукоятка. От продольных смещений валик удерживается упорной шайбой, а корпус коммутирующего устройства стянут шпильками.

При повороте рукоятки переключателя вал и связанные с ним кулачки коммутирующих устройств поворачиваются, производя замыкание или размыкание контактов. В зависимости от электрической схемы переключателя кулачки имеют различную конфигурацию. На каждом пакете расположены четыре неподвижных контакта, замыкаемых попарно контактными мостиками.

Пакетно-кулачковые переключатели и выключатели ПКВ и ПКП рассчитаны на номинальные токи 10, 25, 63, 100 и 160 *а* при номинальном напряжении до 380—440 *в* и частоте 50—60 *гц*. Выпускаются без блок-контакта или с размыкающим блок-контактом, позволяющим их использовать в полумагнитных схемах управления многоскоростными двигателями. ПКП и ПКВ при номинальном токе 10 и 25 *а* имеют до восьми пакетов, при токе

63 *а* — до шести пакетов и при токе 100 и 160 *а* — до трех пакетов. Число коммутационных положений рукоятки — от двух до четырех. Механическая износоустойчивость переключателей и выключателей — не менее 1 000 000 поворотов рукоятки из одного фиксированного положения в другое. Электрическая износоустойчивость ПКП и ПКВ без блок-контактов — не менее 1 000 000 циклов включений и отключений при номинальном режиме и коэффициенте мощности 0,8. Блок-контакты должны выдержать при напряжении 380 *в* не менее 200 000 циклов включений при токе 30 *а* и отключений при токе 3 *а*. Переключатели и выключатели имеют различные исполнения по защищенности от воздействия окружающей среды, по установке и креплению и способу присоединения проводов.

Для ручного переключения полюсов обмотки многоскоростных двигателей могут быть применены также универсальные переключатели УП. Переключатели УП рассчитаны на напряжение сети до 500 *в*. Замкнутые контакты УП допускают длительный ток до 20 *а*, что обеспечивает переключение обмотки двигателей мощностью 2,5 *квт* при 220 *в*, 4,0 *квт* при 380 *в* и 5,0 *квт* при 500 *в*. В дальнейшем переключатели серии УП предполагается заменить серией ПКУ-3. Помимо указанной аппаратуры, для ручного управления многоскоростными двигателями могут быть применены также кулачковые контроллеры серии ПКК и малогабаритные универсальные кулачковые переключатели серии ПКУ-2 с максимальным числом контактов до 48. Номинальный ток ПКУ-2 — 6,3 *а*. Номинальное напряжение 500 *в*.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Харитонов Александр Михайлович

Многоскоростные двигатели в промышленных электроприводах

Редакторы: *В. М. Фейгельман, И. П. Березина*

Обложка художника *Н. Т. Ярешко*

Технический редактор *О. П. Преснякова* Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 5/I 1971 г. Подписано к печати 16/VII 1971 г. Т-09783
Формат 84×108[1]/[32] Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 5,04 Уч.-изд. л. 5,80
Тираж 18 000 экз. Цена 21 коп. Зак. 41

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Цена 21 коп.

Еще больше электротехнической

литературы на

www.bibtem.narod.ru